

UB Braunschweig 84



3462-280-7

SICHERHEITSBETRACHTUNG ÜBER DIE NORMBRANDPRÜFUNG

---

AN TRAGENDEN BAUTEILEN IM WOHNUNGSBAU

---

A B S C H L U S S B E R I C H T

ZUM FORSCHUNGSVORHABEN

VORGELEGT VON:

PROF. DR.-ING. DR.-ING. E.H. K. KORDINA

PROF. DR.-ING. HABIL. U. SCHNEIDER

DR.-ING. V. HENKE

DIPL.-ING. K.-P. LUBIENETZKI

BRAUNSCHWEIG, NOVEMBER 1984

DAS FORSCHUNGSVORHABEN WURDE GEFÖRDERT VOM INSTITUT FÜR  
BAUTECHNIK, BERLIN, GESCH.-Z.: IV/1-5-373/83.



## INHALTSVERZEICHNIS

	<u>Seite</u>
1. ALLGEMEINES . . . . .	1
2. BESCHREIBUNG DER RECHENMODELLE . . . . .	2
2.1 Allgemeines . . . . .	2
2.2 Berechnungsmodell - Stützen . . . . .	3
2.3 Berechnungsmodell - Balken . . . . .	4
3. GRUNDLAGEN DES PROBABILISTISCHEN NACHWEISES . . . . .	5
4. ZUSAMMENSTELLUNG DER BASISVARIABLEN UND VERGLEICHS- RECHNUNGEN . . . . .	7
4.1 Quetschgrenze $\sigma_{\text{#D}}$ und E-Modul . . . . .	8
4.2 Biegedruckfestigkeit $\sigma_{\text{BR}}$ . . . . .	8
4.3 Verteilungsparameter der Abbrandfunktionen . . . . .	9
4.4 Belastungsfunktion . . . . .	10
4.5 Vergleichsrechnungen . . . . .	12
4.5.1 Stützen . . . . .	12
4.5.2 Balken . . . . .	14
5. BERECHNUNG DER $\beta$ -WERTE BEI BRANDEINWIRKUNG NACH DER EINHEITSTEMPERATURKURVE (ETK) . . . . .	16
5.1 Parametervorgabe der untersuchten Holzquerschnitte (Stützen und Balken) . . . . .	16
5.2 Berechnung der $\beta$ -Werte und Wertung . . . . .	20
5.3 Berechnung der Einzelanteile an der Gesamtstreuung der Sicherheitszone . . . . .	23
6. EINBEZIEHUNG "NATÜRLICHER BRÄNDE" . . . . .	26
6.1 Berechnungsmodell nach Hadvig . . . . .	26
6.2 Zu erwartende Brandlast bei Brandabschnitten im Woh- nungsbau . . . . .	28
6.3 Öffnungsfaktor - Annahmen . . . . .	31

	<u>Seite</u>
6.4 Wahl der untersuchten Querschnitte . . . . .	33
6.5 Berechnete $\beta$ -Verläufe . . . . .	35
6.6 Berechnung der Einzelanteile an der Gesamtstreuung der Sicherheitszone ("natürlicher Brand") . . . . .	39
7. ZUSAMMENFASSUNG UND WERTUNG DER ERGEBNISSE . . . . .	46
8. ANHANG (Abbildungen 6.3 - 6.10 und 6.13 - 6.20) . .	49
9. LITERATURVERZEICHNIS . . . . .	58

## Kurzfassung zum Forschungsvorhaben "Sicherheitsbetrachtung über die Normbrandprüfung an tragenden Bauteilen"

Mit der Vorlage des Entwurfes der neuen Musterbauordnung (MBO) im Dezember 1981 kann wegen der Herabsetzung der Anforderungen von "feuerbeständig" in "feuerhemmend" für einige Gebäudearten eine verstärkte Anwendung von Bauteilen aus brennbaren Stoffen in höheren Feuerwiderstandsklassen besonders im Wohnungsbau möglich werden.

In der vorliegenden Untersuchung wird daher erstmals mit Hilfe probabilistischer Berechnungsmethoden das vorhandene Sicherheitsniveau bei der Verwendung von unbedeckten Stützen und Balken aus Brettschichtholz im Wohnungsbau für die im Teil 2 der DIN 4102 (Sept. 1977) angegebenen baustoffabhängigen Feuerwiderstandsklassen F30B und F60B ermittelt. Dabei werden für die zu untersuchenden Balken bzw. Stützen die Mindestquerschnitte entsprechend den Tabellen 61 und 62, bzw. 66 und 67 der DIN 4102, Teil 4 zu Grunde gelegt.

Zur Bestimmung des bei diesen Bauteilen vorhandenen Sicherheitsniveaus wurde daher eine repräsentative Auswahl dieser Bauteile sowohl einer Brandbelastung gemäß der ETK als auch einem "natürlichen Brand" mit unterschiedlichen Randbedingungen unterworfen. Auf der Grundlage der dabei gewonnenen Rechenergebnisse konnte ein Vergleich des jeweils erreichten Sicherheitsniveaus erfolgen.

Die zur Durchführung dieser Berechnungen notwendigen Rechenmodelle wurden in der Untersuchung erläutert und deren Genauigkeitsgrad anhand von Versuchsnachrechnungen demonstriert. Desweiteren wurden die für die Bauteilsicherheit maßgebenden Basisvariablen ermittelt und deren Verteilungsparameter als Grundlage der probabilistischen Berechnung angegeben. Bezüglich der Belastungsannahmen durch Eigengewicht und Verkehrslasten mußten, entsprechend den vorhandenen Literaturangaben, Annahmen getroffen werden; diese wurden jedoch in der Untersuchung erläutert.

Für die im Wohnungsbau zu erwartenden Belastungen und deren Verteilungsparameter wurde eine Literatursichtung europäischer und amerikanischer Quellen durchgeführt. Neben einer Zusammenstellung der dort jeweils angegebenen rechnerischen Brandlasten wurden voneinander differierende Werte verglichen und, wenn notwendig, durch eigene Rechnungen ergänzt bzw. erläutert, um die als charakteristisch zu bezeichnenden Werte als Grundlage des durchzuführenden Vergleiches herauszuarbeiten.

Nach Entwicklung der notwendigen Rechenprogramme zur Traglastbestimmung der jeweiligen Bauteile sowohl unter Brandeinwirkung nach der ETK als auch bei einem "natürlichen Brand", konnte die probabilistische Berechnung mittels iterativer Lösungsalgorithmen durchgeführt werden. Als Resultat ergaben sich daraus die das Versagen des jeweiligen Bauteiles beschreibenden Sicherheitsindices  $\beta$  für Brandeinwirkung gemäß ETK bzw. bei einem "natürlichen Brand". Die Ergebnisse sind, wegen der besseren Anschaulichkeit, graphisch aufgearbeitet und ermöglichen so für den Fall des "natürlichen Brandes" - auf Grund einer Darstellung als Parameterstudie - einen direkten Vergleich des vorhandenen Sicherheitsniveaus bei beliebigen Randbedingungen mit einer Brandeinwirkung gemäß der ETK.

Zusätzlich zu diesen Untersuchungen wurde der Einfluß der Verteilungen der einzelnen Basisvariablen an der Gesamtstreuung der vorhandenen Sicherheitszone dargestellt. Aus diesen Darstellungen kann ein Rückschluß über den Einfluß der einzelnen Basisvariablen auf das Gesamtergebnis gezogen werden; gleichzeitig dient diese Darstellung auch dazu, die angesetzten Annahmen nochmals zu begründen und auch Rückschlüsse für eventuelle weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet zu ziehen.

## Summary of the Research Project "Safety Considerations of the Standard Fire Test of Load-Carrying Building Members"

With the submission of the draft of the model-building regulations (Dec. 1981), an increase in the use of building members consisting of combustible materials especially for dwelling houses may, because of the reduction of some building member requirements from "fire-proof" to "fire-resistive", become possible.

For this reason the present research project was carried out in order to determine, with the aid of probabilistic computational methods, the existing safety-level of unprotected glued laminated timber beams and columns for dwelling constructions according to the material related fire-resistance classes F30-B and F60-B of DIN 4102 (Sept. 1977), part. 2. These computations are based on the minimum required cross-sections for beams and columns according to the tables 61 and 62, 66 and 67 respectively of DIN 4102, part 4.

In order to determine the existing safety-level of these building-members, a representative selection of these building-members was subjected to fire conditions according to the ETK (ISO 834) as well as to "natural fires" with different boundary conditions. On the basis of the obtained computational results a comparison between the existing safety-levels of the different fire conditions could be carried out.

The necessary computational structural models are given and explained within this study, and the obtainable computational accuracy of these models is demonstrated with a comparison between existing building-member tests and the respective computational results. Besides, the basis variables and their distributional parameters relevant for the safety of the building members in question, are ascertained. As concerns the loading



assumptions for the live and dead loads, certain assumptions on the basis of the obtainable literature had to be made, but these assumptions are explained within the report.

For the fire-load, which has to be expected for dwelling houses, a survey of the existing european and american literature was carried out. With a compilation of the fire-loads given in these papers, differing values were compared with each other, and, if necessary, became explained on the basis of some own additional computations.

The probabilistic study was carried out after the developement of the necessary computer programmes for the determination of the load-carrying capacity of the respective building member under ETK (ISO 834) fire conditions as well as under natural fire conditions. As a result of this probabilistic study the so called safety-index  $\beta$  is obtained, which describes the probability of failure of the respective building member, and can serve as a basis for the comparison of the achieved safety levels. As these results are represented graphically as a parameter representation, a direct comparison between the existing safety-levels for ETK (ISO 834) fire conditions and "natural fires" with different boundary conditions can be carried out. Additionally, the influence of the distributions of the different basic variables on the standard deviation of the safety-zone is illustrated. On the basis of these illustrations important conclusions on the influence of the different basis variables on the overall result can be drawn. At the same time, these illustrations are used in order to justify some of the assumptions which had to be made and can serve as a basis for conclusions for further investigations in this field.

Résumée de la project de recherche "Considerations de sûreté  
concernant du test de l'incendie standard aux éléments de  
construction de force"

Avec la présentation de l'ébauche du règlement modèle nouveau en decembre 1981 il est possible que l'application des éléments de construction qui sont composés de substances combustibles, sera augmentée, principalement en la construction d'habitations à cause de la réduction des demandes de la résistance du feu à la retardement au feu pour quelques classes de bâtiments. Pour la première fois cette projet de recherche présente, avec des méthodes des calculs statistiques, la niveau de sûreté qui existe concernant l'application des jambe de force et des poutres qui sont collées en planches par couche et improtéyées contre le feu en la construction d'habitations. Cette niveau est déterminée pour les classes de résistance contre le feu F30B et F60B selon DIN 4102 (Sept. 1977), part 2.

En testant les poutres, respectivement les jambes de force, les plans transversales minima correspondant aux tables 61 et 62, respectivement 66 et 67 de DIN 4102, part 4, sont employés. En déterminant la niveau de sûreté que ces élément de construction detiennent, un choix représentatif de ces éléments fut exposé aussi bien au charge du feu selon ETK que à "l'incendie naturel" avec des conditions periphériques différentes. Sur la base des résultats de calcul on put faire un comparaison des niveaux de sûreté qui étaient accedées respectivement. Les modèles de calcul qui sont nécessaires pour la réalisation de ces calculs sont expliqués dans le rapport. Le degré de précision de ces modèles est démontré au moyen de la vérification des calculs des expériences.

En outre les variables qui sont fondamentales pour la sûreté des éléments de construction sont recherchées, et les paramètres de distribution sont précisés comme la base des calculs statistiques. Il était nécessaire mettre des suppositions de charge concernant le poids propre et le poids de charge selon les valeurs existantes en littérature. Cettes valeurs sont expliquées dans le rapport.

On réalisa une vue d'ensemble de la littérature européenne et américaine concernant les charges d'incendie par de calcul et leurs paramètres de distribution qui sont attendus en la construction d'habitations. En plus de la synthèse des charges d'incendie par le calcul qui sont indiqués respectivement là, on compara les valeurs qui sont différentes l'une de l'autre. Si fut nécessaire, on completa ou expliqua cettés par de calculs proprés, pour que les valeurs caractéristiques sont profilées comme la base en faisant des comparaisons.

Après qu'on eut développé les programmes de calcul qui sont nécessaires pour la détermination du charge des éléments respectifs de construction aussi bien au charge du feu selon ETK que à "l'incendie naturel", on put exécuter les calculs statistiques au moyen des algorithmes itératives de la solution. Comme résultats on reçut les indices de sûreté, nommés  $\beta$ , qui décrivent la défaillance respectif d'éléments au charge du feu selon ETK, respectivement à "l'incendie naturel". Les résultats sont présentés graphiquement à cause de la clarté meilleure. De cette manière ils rendent possibles faire un comparaison direct du niveau existant de sûreté entre le cas de "l'incendie naturel" à conditions périphériques facultatives et le cas du charge du feu selon ETK.

De plus on détermina l'influence des distributions des variables particulières de base sur la variance totale de la zone existante de sûreté. Cettes présentations rendent possibles une déduction concernant l'influence des variables particulières de base sur le résultat total ; du coup cette présentation a la tâche de justifier des suppositions et faire conclusions concernant recherches autres eventuels.

## 1. Allgemeines

Mit der Vorlage des Teiles 2 der DIN 4102, Ausgabe September 1977, erfolgte erstmalig eine systematische Berücksichtigung brennbarer Baustoffe in allen Feuerwiderstandsklassen, wobei die bauaufsichtlichen Vorschriften jedoch nicht die Anwendung aller damit möglichen Unterklassen für bestimmte Gebäude zulassen. Dieses erfolgte jedoch ohne vorherige ausführliche Klärung der Auswirkungen auf das durch das genormte Prüfverfahren vorgezeichnete Sicherheitsniveau.

Mit der Vorlage des Entwurfes der neuen Musterbauordnung (MBO - Ausgabe Dezember 1981) wurden jedoch die Anforderungen an Bauteile in bestimmten Gebäuden von "feuerbeständig" in "feuerhemmend" geändert, und damit ist eine erweiterte Verwendung brennbarer Baustoffe möglich geworden. Somit rückt die Frage der bauaufsichtlich gewünschten Sicherheit dieser Bauwerke unter Brandeinwirkung in den Vordergrund.

Die Modellierung der Brandeinwirkung von Bauteilen erfolgt unter Zugrundelegung der Einheitstemperaturkurve (ETK) nach DIN 4102, Teil 2. Aus Brandversuchen in Wohngebäuden ist bekannt, daß es sich hierbei um eine sehr grobe Modellierung handelt, da die tatsächlich vorliegenden Temperatur-Zeit-Verläufe sehr stark von der jeweiligen Brandbelastung und den herrschenden Lüftungsbedingungen abhängen. Die genormte Brandeinwirkung liegt i. allg. deutlich über den in der Praxis zu erwartenden Brandbeanspruchungen. Es erscheint deshalb notwendig, wenn auch an dieser Stelle nur für bestimmte Bauteile durchgeführt, die so entstandene Sicherheitsmarge genauer zu quantifizieren, um evtl. vorhandene Sicherheitsreserven aufzuzeigen oder festzustellen, bei welcher Parameterkombination das z.Z. vorhandene Sicherheitsniveau unterschritten wird.

Die dazu notwendigen probabilistischen Sicherheitsbetrachtungen haben erst in jüngster Zeit Eingang in die brandschutztechnische Forschung gefunden. Zur Lösung der gestellten Aufgabe soll deshalb unter Einbeziehung der relevanten Parameter und deren Verteilungen der jeweils vorhandene Sicherheitsindex  $\beta$  /1/ bei Brandeinwirkung gemäß ETK sowie bei einem natürlichen Brand mit unterschiedlichen Randbedingungen ermittelt und durch den Ver-

gleich dieses Sicherheitsindexes Aussagen zur Beurteilung der Brandsicherheit im Wohnungsbau abgeleitet werden.

Die erforderlichen Berechnungen werden für brettschichtverleimte Balken und Stützen durchgeführt, da für diese Bauteile umfangreiche auswertbare Angaben über ausgeführte Bauteilversuche vorliegen. Die Berechnungsgrundlagen der Rechenmodelle und die durchgeführten Vergleichsrechnungen zu deren Überprüfung werden im folgenden Abschnitt zusammengestellt.

## 2. Beschreibung der Rechenmodelle

### 2.1 Allgemeines

Die Tragfähigkeit von brettschichtverleimten Holzbauteilen vermindert sich im Brandfall sowohl durch eine - bedingt durch den Abbrand des Querschnittes - kontinuierliche Querschnittsreduzierung wie auch durch den temperaturbedingten Abfall der Holzfestigkeit sowie des Elastizitätsmodules. Bei den an verschiedenen Stellen durchgeführten Bauteilversuchen zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer von Holzbauteilen wurde jedoch, um eine möglichst einfache Handhabung der Rechenmodelle zu gewährleisten, die Temperaturabhängigkeit der Materialparameter bei der Entwicklung der Rechenmodelle bewußt außer acht gelassen. Aus diesem Grund liegen gezielte und allgemeingültige Aussagen über die Temperaturabhängigkeit der Materialkennwerte des Holzes noch nicht vor. Der Einfluß der Brandeinwirkung auf die Feuerwiderstandsdauer wird demnach ausschließlich durch die Definition einer Abbrandfunktion berücksichtigt. Es kann jedoch gezeigt werden, daß bei entsprechender Auswertung und Aufbereitung der Versuchswerte eine Abbrandfunktion definiert werden kann, welche es erlaubt, die vorhandenen und im Versuch ermittelten Feuerwiderstandsdauern mit ausreichender Genauigkeit nachzuvollziehen.

## 2.2 Berechnungsmodell - Stützen

Die Grundlagen des Berechnungsmodelles für Holzstützen gehen auf /2/ zurück. Dabei ergibt sich die theoretische Knickspannung  $\sigma_{kr}(w)$  in Abhängigkeit vom Abbrand  $w$  und der Stabschlankheit  $\lambda(w)$  zu:

$$\sigma_{kr}(w) = F1 - \sqrt{F1^2 - F2} \quad (2.1)$$

$$\text{mit} \quad F1 = 0,5 \cdot (\sigma_D + \pi^2 \cdot E \cdot (1 + \epsilon) / \lambda^2(w)) \quad (2.2)$$

$$F2 = \sigma_D \cdot \pi^2 \cdot E / \lambda^2(w) \quad (2.3)$$

$$\epsilon = 0,1 + \lambda(w) / 200 \quad (2.4)$$

Die Festigkeitseigenschaften des Holzes werden dabei durch die

Quetschgrenze  $\sigma_D$   
und den Elastizitätsmodul  $E$

beschrieben. Die Stützentraglast zum Zeitpunkt  $t$  kann dann zu

$$P(t) = F_{\text{Rest}}(t) \cdot \sigma_{kr}(w) \quad (2.5)$$

ermittelt werden. Der Restquerschnitt  $F_{\text{Rest}}$  und die vom Abbrand abhängige Schlankheit  $\lambda(w)$  werden gemäß den Ableitungen in /2/ oder /3/ bestimmt, so daß auf eine nochmalige Wiedergabe an dieser Stelle verzichtet werden kann.

Da die Angaben in /3/ wohl die zur Zeit umfangreichste Sichtung und Auswertung bezüglich der Versuchsergebnisse an Holzstützen und Holzbalken darstellen, soll für die durchzuführenden Untersuchungen auf die dort unter Auswertung aller verfügbaren Versuchsergebnisse gewonnene Abbrandfunktion zurückgegriffen werden. Mit dieser Abbrandfunktion lassen sich die bekannten Versuchswerte im Mittel am genauesten nachrechnen:

$$w_{\text{ges}} = 0,059 \cdot t + 0,64 \quad [\text{cm}] \quad (2.6)$$

Eine kurze Gegenüberstellung von Rechenwerten und Versuchswerten zur Veranschaulichung der mit solch einem Rechenmodell zu erreichenden Genauigkeit wird in Abschnitt 4.5 wiedergegeben.

### 2.3 Berechnungsmodell - Balken

Die Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer oder der Resttragfähigkeit von Balken soll wiederum auf der Grundlage der in /2/ bzw. /3/ angegebenen Untersuchungen durchgeführt werden. Dabei ergibt sich die Resttragfähigkeit des Querschnittes (noch aufnehmbares Biegemoment zum Zeitpunkt  $t$ ) zu:

$$M_{\text{Rest}}(t) = W_{\text{Rest}}(t) \cdot \sigma_{\text{BR}} \quad (2.7)$$

mit  $W_{\text{Rest}}$  = Restwiderstandsmoment nach /3/

$\sigma_{\text{BR}}$  = Biegedruckfestigkeit des Holzes

Bezüglich der Brandeinwirkung auf den Querschnitt soll an dieser Stelle eine drei- bzw. vierseitige Beflammung unterschieden werden. Dabei wird die Abbrandrate - abweichend der bei Holzstützen - für die Seitenflächen bzw. die Ober- und Unterseiten gemäß den Versuchsauswertungen unterschiedlich festgelegt. Die beste Übereinstimmung bei der Nachrechnung aller verfügbaren Versuchswerte wurde wiederum in /3/ mit den folgenden Abbrandfunktionen erzielt:

$$\text{Seitlich:} \quad W_s = 0,0753 \cdot t + 0,892 \quad (2.8)$$

$$\text{Ober- bzw. Unterseite: } W_{\text{O,u}} = 1,472 \cdot w_s - 0,012 \quad (2.9)$$

Beim Vergleich der Abbrandfunktionen nach (2.8) und (2.9) fällt auf, daß sich für die Ober- und Unterseite ein wesentlich größerer Abbrand als für die Seitenflächen ergibt. Dieses gibt die Tatsache wieder, daß - bedingt durch das Herabfallen verkohlter Holzstücke auf der Unterseite bzw. Abdrücken auf der Oberseite - an diesen Querschnittsseiten größere Abbrandraten gemessen werden. Analog Abschnitt 2.2 wird in Abschnitt 4.5 eine kurze Gegenüberstellung

der mit diesem Rechenmodell zu erreichenden Genauigkeit bei der Nachrechnung von Versuchsergebnissen gegeben.

### 3. Grundlagen des probabilistischen Nachweises

Die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit der brandbeanspruchten Bauteile erfolgt gemäß den in /1/ angegebenen Grundlagen. Dabei wird eine Grenzzustandsgleichung

$$g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

definiert, welche die Differenz des resultierenden Bauteilwiderstandes zu der auftretenden Beanspruchung (Einwirkung) in Abhängigkeit von den Basisvariablen  $x_i$  beschreibt. Versagen des Bauteiles tritt bei  $g \leq 0$  ein.

Es wird angenommen, daß die Basisvariablen vollständig unabhängig und durch Normalverteilungen in der Form

$$x_i \sim N(\bar{x}_i, \sigma_i) \quad (3.2)$$

beschrieben werden können.

Die größte Wahrscheinlichkeit des Bauteilversagens tritt am sog. Bemessungspunkt  $x_i^*$  ein, für welchen gilt:

$$x_i^* = \bar{x}_i - \alpha_i \beta \sigma_i \quad (3.3)$$

mit  $x_i$  - Mittelwert der Basisvariablen  $i$

$\sigma_i$  - Standardabweichung der Basisvariablen  $i$



Die Wichtungsfaktoren  $\alpha_i$ , welche sozusagen den Einfluß der einzelnen Basisvariablen darstellen, werden nach /1, 4/ berechnet:

$$\alpha_i = \frac{\left. \frac{\partial G}{\partial x_i} \right|_{\underline{x}_i^*} \cdot \sigma_i}{\left( \sum_{i=1}^n \left( \left. \frac{\partial G}{\partial x_i} \right|_{\underline{x}_i^*} \cdot \sigma_i \right)^2 \right)^{1/2}} \quad (3.4)$$

Weiterhin stellt der Sicherheitsindex  $\beta$  in (3.3) über

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (3.5)$$

eine direkte Maßzahl zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  dar, wobei  $\Phi$  die normierte Verteilungsfunktion der Normalverteilung beschreibt.

Die Berechnung von  $\alpha_i$  und  $\beta$  erfolgt elektronisch nach folgendem Iterationsschema:

- a) Vorgabe eines Ausgangswertes für  $\beta$ ,  $\alpha_i$  und damit für  $\underline{x}_i^*$
- b) Bildung der num. Ableitungen  $\left. \frac{\partial G}{\partial x_i} \right|_{\underline{x}_i^*}$  und damit Berechnung von  $\alpha_i$
- c) Berechnung der verbesserten Bemessungspunkte  $\underline{x}_i^*$  nach (3.3)
- d) Durch Variation von  $\beta$  wird  $\left. \frac{\partial G}{\partial \beta} \right|_{\underline{x}_i^*}$  numerisch als Differenzenquotient gebildet und ein verbesserter  $\beta$ -Wert so bestimmt, daß  $g(\underline{x}_i^*) = 0$  wird.
- e) Konvergenzkontrolle, evtl. Sprung nach b)

Für nicht normalverteilte Basisvariablen sind im jeweiligen Iterationsschritt die der Normalverteilung angepaßten Mittelwerte  $\bar{x}'$  und Standardabweichungen  $\sigma'$  zu bestimmen. Dabei wird die Anpassung über  $\bar{x}'$  und  $\sigma'$  im Bemessungspunkt an eine Normalverteilung so vorgenommen /4/, daß mit diesen Werten die gleiche Fraktile wie bei der eigentlichen Verteilungsfunktion erreicht wird. Diese Umrechnung wird in der elektronischen Berechnung bei von der Normalverteilung abweichenden Verteilungen jeweils mit ausgeführt.

#### 4. Zusammenstellung der Basisvariablen und Vergleichsrechnungen

Zur Durchführung der probabilistischen Berechnung ist zunächst die Festlegung der die Basisvariablen beschreibenden Verteilungsfunktionen notwendig. Diese sollen im folgenden für den Fall der Brandeinwirkung nach der ETK zusammengestellt werden; dabei wird die Brandeinwirkung nach der ETK als deterministische Größe betrachtet.

Gemäß den Angaben in Abschnitt 2 sind Verteilungsannahmen für folgende Basisvariablen zu treffen:

1. Quetschgrenze  $\sigma_{\parallel D}$
2. Elastizitätsmodul  $E$
3. Abbrandrate Stützen  $w$
4. Biegedruckfestigkeit und -zugfestigkeit des Holzes  $\sigma_{BR}$
5. a) Abbrandrate Balken: seitlich  $w_s$   
b) Abbrandrate Balken: oben und unten  $w_{o,u}$
6. Eigengewicht  $g$
7. Verkehrslast  $p$

#### 4.1 Quetschgrenze $\sigma_{\parallel D}$ und E-Modul

In /3/ durchgeführte Auswertungen zeigen, daß die Festigkeits-eigenschaften des Holzes relativ großen Schwankungen unterliegen. Dort wird für die Quetschgrenze

$$\bar{\sigma}_{\parallel D} = 37,8 \text{ N/mm}^2$$

und für den Elastizitätsmodul

$$\bar{E} = 12750 \text{ N/mm}^2$$

als Mittelwerte angegeben.

Sie sollen auch in den folgenden Rechnungen verwendet werden.

Für den Variationskoeffizienten dieser Größen können näherungsweise in DIN 68364 /5/ aufgeführte Werte von

$$v_{\sigma_{\parallel D}} \cong 16 \%$$

$$v_E \cong 20 \%$$

verwendet werden. Diese Angaben stimmen auch mit den in /3/ gemachten Auswertungen gut überein.

Um die Verteilungen nach unten hin zu begrenzen, wird eine Log.-Normalverteilung angesetzt.

#### 4.2 Biegedruckfestigkeit $\sigma_{BR}$

Auch bezüglich der Biegedruckfestigkeit soll hier auf die Auswertungen in /3/ zurückgegriffen werden. Diese Biegedruckfestigkeit ist eine rechnerische Größe, die sich bei der Annahme einer

linearen Spannungsverteilung über die Querschnittshöhe aus der Versuchsbruchlast bei Balkenversuchen ermitteln läßt. Als Mittelwert wird in /3/

$$\bar{\sigma}_{BR} = 77,3 \text{ N/mm}^2$$

angegeben.

Der Variationskoeffizient  $v_{BR}$  kann wiederum in Anlehnung an DIN 68364 /5/ zu

$$v_{BR} = 16 \%$$

festgesetzt werden.

Analog 4.1 wird als Verteilungsfunktion ebenfalls eine log. Normalverteilung angesetzt.

#### 4.3 Verteilungsparameter der Abbrandfunktionen

Die in Abschnitt 2.2 und 2.3 angegebenen Abbrandfunktionen bestimmen die Mittelwerte der Abbrandrate zu jedem Zeitpunkt  $t$ , so daß hier nur noch die zu erwartenden Variationskoeffizienten für die jeweiligen Abbrandraten festzulegen sind. Bei den Auswertungen zu /3/ hat sich gezeigt, daß je nach Bauteil und Beflammungsart mit unterschiedlichen Variationskoeffizienten zu rechnen ist. Danach können folgende Werte angenommen werden:

$$v_{\text{Stütze}} = 8,7 \%$$

$$v_{\text{Balken, seitlich}} = 12 \%$$

$$v_{\text{Balken; oben, unten}} = 20 \%$$

Da die Versuchswerte der gemessenen Abbrandraten eine gleichmäßige Abweichung nach oben und unten zeigen, erscheint für diesen Fall die Annahme einer Normalverteilung gerechtfertigt.

#### 4.4 Belastungsfunktion

Als weitere Einflußvariable ist die Belastungsfunktion festzulegen. In erster Näherung soll hier angenommen werden (vgl. hierzu auch Zwischenbericht), daß sich das Verhältnis von Eigengewicht zu Nutzlast aus etwa gleichen Teilen zusammensetzt. Dabei kann davon ausgegangen werden, daß das Eigengewicht relativ genau bekannt ist. Aus diesem Grund wird hierfür ein Variationskoeffizient

$$v_g = 10 \%$$

bei Annahme einer Normalverteilung als ausreichend angesehen.

Die Nutzlasten setzen sich im wesentlichen aus Verkehrslasten und evtl. Wind- und Schneelasten zusammen. Da diese Belastungen wesentlich stärker streuen - sich jedoch im Rahmen der hier durchzuführenden allgemeineren Auswertung einer genaueren Erfassung entziehen - wird in Anlehnung an /6/ folgende Annahme getroffen:

Nennwert = 90 % - Fraktile der 50-Jahres-Maxima  
Variationskoeffizient  $v_p = 40 \%$

Da die Wahrscheinlichkeit für das Zusammentreffen dieser 50-Jahres-Maxima mit dem seltenen Ereignis "Brand" äußerst gering ist, sind für diesen Fall i. allg. nur die momentanen Maximalwerte (1-Jahres-Werte) anzusetzen. Diese lassen sich unter Ansatz einer Extremwertverteilung des Types I (Fisher-Tippett-Verteilung) nach /7/ bestimmen, wobei nach /8/ bei Wohnbauten mit sieben unabhängigen

Lastwechseln  $r$  im Bezugszeitraum gerechnet werden kann. Damit ergibt sich:

Verteilung:  $F(x) = \exp (-\exp (-\alpha \cdot (x - u)))$  (4.1)

mit  $\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6} \cdot \sigma}$  (4.2)

$u = \bar{x} - \frac{0,57722}{\alpha}$  (4.3)

Umkehr-

funktion:  $x = u + \frac{-\ln (-\ln F(x))}{\alpha}$  (4.4)

$\rightarrow x^* = \bar{x} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{6} \cdot v_x}{\pi} (0,57722 + \ln (-\ln F(x^*)))\right)$  (4.5)

Mit  $x^* = \text{Nennwert}$

$F(x^*) = 0,9$

$v_x = 0,4$

folgt:  $\bar{x} = x^*/1,522$  (4.6)

Die Berechnung der quasistatistischen Anteile erfolgt dann mit Hilfe von (4.7) und (4.8) - vgl. /7, 8/ - zu:

$\bar{x}_{p,D} = \bar{x} + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \sigma_{p,D} \cdot \ln \left(\frac{1}{r}\right)$  (4.7)

$\sigma_{p,D} \cong 0,4 \cdot \bar{x}$  (4.8)

Die so ermittelten Werte können dann unter Annahme einer Extremal-Typ-I-Verteilung in der probabilistischen Berechnung weiter verwendet werden.

#### 4.5 Vergleichsrechnungen

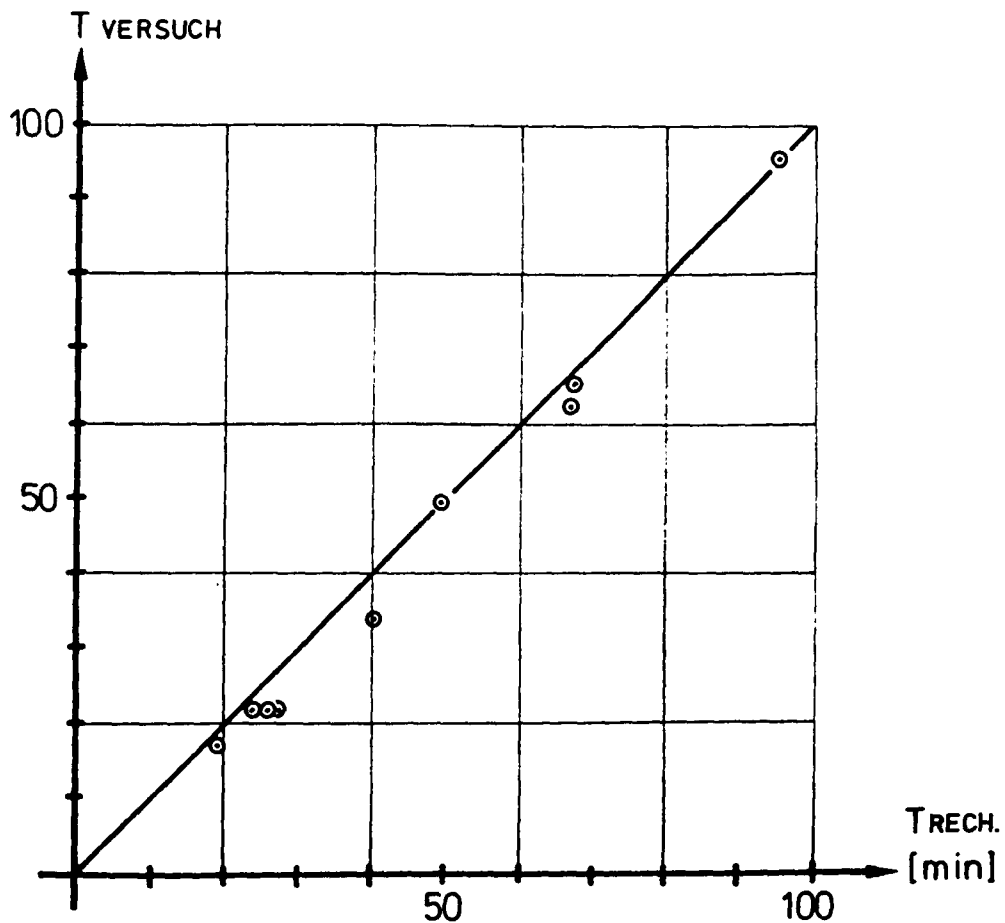
##### 4.5.1 Stützen

Zur Überprüfung des Rechenmodelles und zur Veranschaulichung der mit solch einem Rechenmodell zu erreichenden Genauigkeit sollen im folgenden die im Versuch ermittelten Versagenszeitpunkte für Stützen mit möglichst genau definierten Lagerungsbedingungen nachgerechnet werden. Die in der Tabelle 4.1 enthaltenen Angaben über Belastung, Geometrie und Versagenszeitpunkt wurden /3/ entnommen, wobei sich dort eine weitergehende Zusammenstellung befindet.

	b/d [cm]	s <sub>k</sub> [m]	F [kN]	t <sub>Vers</sub> [min]	t <sub>Rech</sub> [min]	Bezeichnung
1	14/14	3,22	95,1	17	18,5	Vers.-Nr. 6-IBMB
2	28/14	3,22	190,2	22	23,5	" 7- "
3	28/14	3,22	86,4	34	40,5	" 8- "
4	42/14	3,22	285,3	22	25,5	" 10- "
5	56/14	3,22	380,4	22	26,0	" 11- "
6	28/28	5,93	415,8	50	49,5	" 4- "
7	56/28	5,91	834,5	63	60,5	" 1- "
8	56/28	5,91	379,3	96	95	" 3- "
9	112/28	5,82	1695,4	66	67	" 5- "

Tabelle 4.1

Eine bessere Übersicht über die zu erreichende Genauigkeit ergibt die Darstellung in Bild 4.1.:



**Bild 4.1:** Vergleich der Versuchsergebnisse mit den rechnerischen Bruchzeitpunkten (Stützen)

Diese kurze Zusammenstellung zeigt, daß mit dem dargestellten Rechenmodell und den dazugehörigen Materialkennwerten eine relativ gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit den rechnerischen Werten erreicht werden kann, so daß diese Grundlagen bei der probabilistischen Berechnung weiter verwendet werden können.



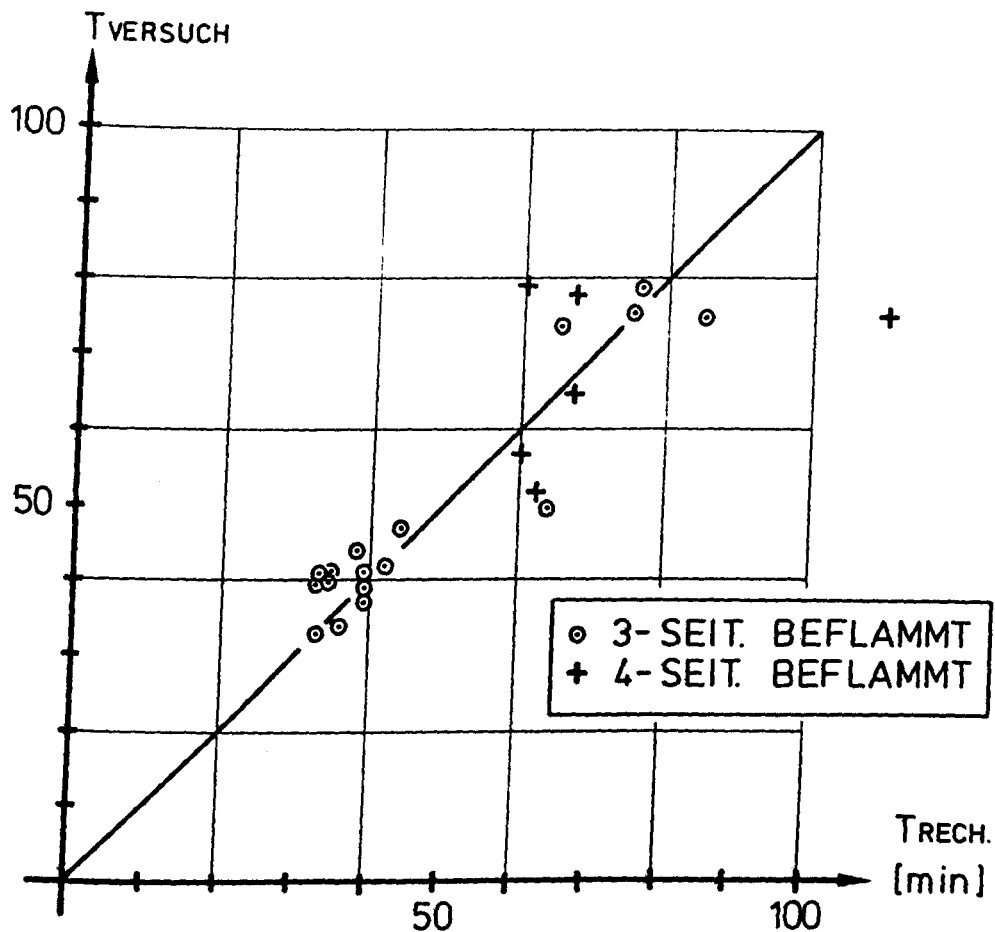
#### 4.5.2 Balken

Analog zur Überprüfung des Stützenmodelles wurden die in Tabelle 4.2 angegebenen und /3/ entnommenen signifikanten Balkenversuche nachgerechnet.

Nr.	b/d [ cm ]	Befl.	$\sigma_{ID}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	t <sub>Vers</sub> [ min ]	t <sub>Rech</sub> [ min ]	Bezeichnung
1	16 /26	dreiseitig	11	56	60	Nr. 5/11 IBMB
2	16 /28		11	52	62	" 5/5 "
3	18 /27,9		11	65	67	" 4/9 "
4	20 /25		11	78	67	" 4/10 "
5	25 /20		11	79	60	" 4/11 "
6	27,5/43,6		11	75	110	" 4/14 "
7	12 /29,2	vierseitig	11	34	36	" 4/7 "
8	12 /33,4		11	37	39	" 4/1 "
9	12 /33,4		11	39	39	" 4/5 "
10	12 /37,5		11	42	42	" 5/1 "
11	14 /25		11	41	33	" 4/8 "
12	14 /28,6		11	44	38	" 4/2 "
13	16 /25		11	41	34	" 4/3 "
14	16 /28,1		11	41	39	" 5/2 "
15	16 /60		11	49	64	" 5/7 "
16	20 /22,5		11	33	33	" 5/3 "
17	20 /30		11	47	44	" 4/4 "
18	20 /60		11	79	76	" 5/8 "
19	22 /20,5		11	40	33	" 5/4 "
20	24 /50		11	76	75	" 4/2 "
21	24 /60		11	75	85	" 5/9 "
22	30 /40		11	74	65	" 4/3 "

Tabelle 4.2

In der folgenden Darstellung (Bild 4.2) werden die rechnerischen Feuerwiderstandsdauern den Versuchswerten zur besseren Anschaulichkeit noch einmal gegenübergestellt.



**Bild 4.2:** Vergleich der Versuchsergebnisse mit den rechnerischen Bruchzeitpunkten (Balken)

Im Gegensatz zu Bild 4.1 zeigt Bild 4.2 eine etwas größere Abweichung der gemessenen von den rechnerisch ermittelten Versagenszeiten. Dies liegt zum Teil am größeren ausgewerteten Versuchsumfang, aber auch an der größeren Variation der Abbrandrate bei Holzbalken, was ja auch in den größeren Variationskoeffizienten nach Abschn. 4.3 zum Ausdruck kommt. Da jedoch die Versuchswerte im Mittel relativ gut rechnerisch wiedergegeben werden, soll das aufgezeigte Rechenmodell auch für die folgenden Untersuchungen weiter zur Anwendung kommen.

## 5. Berechnung der $\beta$ -Werte bei Brandeinwirkung nach der Einheits-temperaturkurve (ETK)

### 5.1 Parametervorgabe der untersuchten Holzquerschnitte (Stützen und Balken)

Um den Umfang der zu untersuchenden Holzquerschnitte sowohl bei den Stützen wie auch bei den Balken auf ein vernünftiges Maß einzuschränken, soll eine Auswahl der zu untersuchenden Querschnitte getroffen werden.

Bei Holzstützen werden in DIN 4102, Teil 4, Tab. 66 und 67, je nach Ausnutzungsgrad des Querschnittes für verschiedene Knicklängen und Seitenverhältnisse  $b/d$  Mindestquerschnittsabmessungen angegeben. Die Untersuchungen sollen im folgenden für die beiden Feuerwiderstandsklassen F30-B und F60-B jeweils für den höchsten und niedrigsten Ausnutzungsgrad, die höchste<sup>\*)</sup> und niedrigste angegebene Knicklänge sowie für die angegebenen Seitenverhältnisse durchgeführt werden. Damit ergeben sich folgende - wie in Tabelle 5.1 angegeben - zu untersuchende Querschnitte:

b/d	$\sigma_{\parallel D} = \frac{\omega \cdot F}{b \cdot d}$	$d_{\min}$ F30-B		$d_{\min}$ F60-B	
		$s_k = 2 \text{ m}$	$s_k = 5 \text{ m}$	$s_k = 2 \text{ m}$	$s_k = 5 \text{ m}$
1	11 N/mm <sup>2</sup>	16	18,4	24	30
	5 N/mm <sup>2</sup>	12	13,2	18	21
2	11 N/mm <sup>2</sup>	14	16,4	22	27,4
	5 N/mm <sup>2</sup>	12	12,6	17	19,4

Tabelle 5.1: Untersuchte Stützenparameter

<sup>\*)</sup> Die in Tab. 66 und 67 angegebene höchste Knicklänge von 7 m wird vernachlässigt, da sie zu unzulässigen Schlankheiten ( $\lambda \geq 150$ ) gemäß DIN 1052 führen kann.

Aus den in Tabelle 5.1 angegebenen Stützenparametern können die zulässigen Stützenbelastungen  $F_{zul}$  - wie in Tabelle 5.2 angegeben - ermittelt werden:

	$\sigma_{\parallel D}$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	$s_k$ [ m ]	b [ cm ]	d [ cm ]	$\omega$	$F_{zul} = \frac{\sigma_{\parallel D} \cdot A}{\omega}$ [ kN ]
F30-B	11	2	16	16	1,31	215,8
		2	14	28	1,41	305,8
		5	18,4	18,4	2,74	135,9
		5	16,4	32,8	3,34	177,2
	5	2	12	12	1,57	45,9
		2	12	24	1,57	91,7
		5	13,2	13,2	5,15	16,9
		5	12,6	25,2	5,65	28,1
F60-B	11	2	24	24	1,14	555,8
		2	22	44	1,17	914,0
		5	30	30	1,57	630,6
		5	27,4	54,8	1,69	977,3
	5	2	18	18	1,25	130,1
		2	17	34	1,27	227,6
		5	21	21	2,28	96,7
		5	19,4	38,8	2,55	147,6

Tabelle 5.2: Zulässige Stützenbelastung

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Balkenquerschnitte soll analog vorgegangen werden. Auch für diese Bauteile sollen die Untersuchungen die in DIN 4102, Tabelle 62, angegebenen Feuerwiderstandsklassen F30-B und F60-B, den höchsten und einen mittleren Ausnutzungsgrad (der niedrigste angegebene Ausnutzungsgrad erscheint für die hier anstehenden Untersuchungen zu niedrig angesetzt) sowie die Seitenverhältnisse  $b/h = 1$  und  $b/h = 4$  umfassen. Des weiteren wird bei der Brandeinwirkung nach drei- und vierseitiger Beflammung des Querschnittes unterschieden. Damit ergeben sich die in Tabelle 5.3 angegebenen, zu untersuchenden Balkenquerschnitte:

Befl.	Spannung $\sigma_{zul}$	F30-B		F60-B	
		$b/h = 1$	$b/h = 4$	$b/h = 1$	$b/h = 4$
drei- seitig	14 N/mm <sup>2</sup>	18/18	13 /52	36/36	26 /104
	7 "	10/10	8,5/34	20/20	16,5/ 66
vier- seitig	14 "	24/24	13,5/54	48/48	27 /108
	7 "	15/15	9 /36	30/30	17,5/ 70

Tabelle 5.3: Untersuchte Balkenparameter

Aus den in Tabelle 5.3 angegebenen Querschnittsabmessungen können wiederum die in Tabelle 5.4 angegebenen zulässigen Biegemomente der jeweiligen Querschnitte ermittelt werden.

	$\sigma_{zul}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Befl.	b [cm]	h [cm]	$W_x$ [cm <sup>3</sup> ]	$M_{zul}$ [kNm]
F30-B	14	3	18	18	972	13,61
		3	13	52	5858	82,02
		4	24	24	2304	32,26
		4	13,5	54	6561	91,85
	7	3	10	10	167	1,17
		3	8,5	34	1637	11,46
		4	15	15	563	3,94
		4	9	36	1944	13,61
F60-B	14	3	36	36	7776	108,86
		3	26	104	46869	656,17
		4	48	48	18432	258,05
		4	27	108	52488	734,83
	7	3	20	20	1333	9,33
		3	16,5	66	11979	83,85
		4	30	30	4500	31,50
		4	17,5	70	14292	100,04

**Tabelle 5.4: Zulässige Balkenbiegemomente**

Bezüglich der jeweiligen Definition und Festsetzung der Eigengewichts- sowie Nutzlastanteile und deren Verteilungsannahmen wird auf Abschnitt 4.4 verwiesen.

## 5.2 Berechnung der $\beta$ -Werte und Wertung

Auf der Basis der in den vorausgehenden Abschnitten beschriebenen Grundlagen wurden die vorhandenen  $\beta$ -Werte elektronisch ermittelt. Diese sind in Tabelle 5.5 für Holzstützen und in Tabelle 5.6 für Balkenquerschnitte wiedergegeben.

	$\sigma_{\parallel D_0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$s_k$	d [cm]	b [cm]	$\beta$ -Wert
F30-B	11	2	16	16	1,78
		2	14	28	1,64
		5	18,4	18,4	0,98
		5	16,4	32,8	1,10
	5	2	12	12	1,08
		2	12	24	2,51
		5	13,2	13,2	1,10
		5	12,6	25,2	1,96
F60-B	11	2	24	24	1,62
		2	22	44	2,20
		5	30	30	1,51
		5	27,4	54,8	1,65
	5	2	18	18	0,45
		2	17	34	1,82
		5	21	21	0,50
		5	19,4	38,8	1,11

Tabelle 5.5:  $\beta$ -Werte bei Holzstützen

	$\sigma_{zul}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Befl.	b [cm]	h [cm]	$\beta$ -Wert
F30-B	14	3	18	18	2,34
		3	13	52	4,06
		4	24	24	1,59
		4	13,5	54	3,42
	7	3	10	10	0,68
		3	8,5	34	2,00
		4	15	15	0,17
		4	9	36	2,13
F60-B	14	3	36	36	3,24
		3	26	104	4,07
		4	48	48	2,53
		4	27	108	4,00
	7	3	20	20	1,69
		3	16,5	66	3,31
		4	30	30	1,13
		4	17,5	70	3,40

Tabelle 5.6:  $\beta$ -Werte bei Holzbalken

Ein Vergleich der  $\beta$ -Werte für Stützen und Balken zeigt, daß sich mit den in DIN 4102 vorgegebenen Abmessungen und auf der Grundlage der hier angegebenen Rechenmodelle sowie Verteilungsannahmen kein einheitliches Sicherheitsniveau ergibt. Bei den Stützen ergeben sich  $\beta$ -Werte zwischen 0,5 und 2,50 sowie bei den Balken zwischen 0,17 und 4,06. Dabei ist anzumerken, daß das rechnerische Sicherheitsniveau bei den Balken im allgemeinen etwas höher zu liegen scheint. Diese Tendenz gilt für beide Feuerwiderstandsklassen.



Weiterhin lassen sich noch folgende Tendenzen beobachten:

- a) Bei den Stützen liegen die  $\beta$ -Werte für  $b/d = 1$  immer etwas unter denen des Abmessungsverhältnisses  $b/d = 2$ .
- b) Beim Ausnutzungsgrad  $\sigma_{\parallel D} \approx 5 \text{ N/mm}^2$  liegen die  $\beta$ -Werte der Stützen durchweg etwas unter denen des Ausnutzungsgrades  $\sigma_{\parallel D} = 11 \text{ N/mm}^2$ . Dies bedeutet, daß diese Bauteile sicherheitstechnisch im Vergleich etwas zu günstig beurteilt werden.
- c) Bei Balken mit vierseitiger Beflammung ergeben sich etwas geringere  $\beta$ -Werte als bei denen mit dreiseitiger Beflammung. Auch diese Bauteile werden dann - im Vergleich zu denen mit vierseitiger Beflammung - zu günstig beurteilt.
- d) Die  $\beta$ -Werte der Balken beim Ausnutzungsgrad  $\sigma_{zul} = 7 \text{ N/mm}^2$  liegen im Vergleich immer unter denen des Ausnutzungsgrades  $\sigma_{zul} = 14 \text{ N/mm}^2$ .

Ohne an dieser Stelle eine Aussage über den einzuhaltenen rechnerischen  $\beta$ -Wert machen zu wollen, soll hier angeregt werden, die DIN 4102 diesbezüglich eingehend systematisch zu untersuchen und bei der zukünftigen Festlegung von Bauteilabmessungen in Tabellenform diese so zu bestimmen, daß im gesamten Anwendungsgebiet ein einheitliches Sicherheitsniveau eingehalten wird.

### 5.3 Berechnung der Einzelanteile an der Gesamtstreuung der Sicherheitszone

Die Grenzzustandsbedingung (3.1) beschreibt mit den Mittelwerten der Basisvariablen die Sicherheitszone  $Z$  als Differenz der einwirkenden zu den widerstehenden Größen ( $Z = R_i - S_i$ ). Die prozentualen Einzelanteile  $A_i$  der jeweiligen Basisvariablen an der Streuung der Sicherheitszone können dann mit Hilfe von (5.1)

$$A_i = \frac{\left( \frac{\partial g}{\partial x_i} \right)^2 \Big|_{x=\bar{x}} \cdot \sigma_{xi}^2}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial x_i} \right)^2 \Big|_{x=\bar{x}} \cdot \sigma_{xi}^2} \quad (5.1)$$

berechnet werden.

Zur Verdeutlichung der Einzelbeiträge der Basisvariablen sind diese prozentualen Anteile in den Bildern 5.1 - 5.4 für einige ausgewählte Stützen- und Balkenquerschnitte für verschiedene Brandeinwirkungsauern aufgetragen. Aus diesen Bildern wird mit steigender Brandeinwirkungsauer der dominierende Einfluß der Abbrandrate  $w$  ersichtlich, welche z.B. bei den Stützen zu ca. 60 - 75 % zur Gesamtstreuung beiträgt. Bei den Balkenquerschnitten sind die Verhältnisse ähnlich. Auch hier dominiert - bedingt durch die Auswirkung auf das Widerstandsmoment des Restquerschnittes - der Einfluß der oberen und unteren Querschnitts-Abbrandrate. Dahingegen trägt jedoch der seitliche Abbrand nur ca. 10 % zur Gesamtstreuung bei.

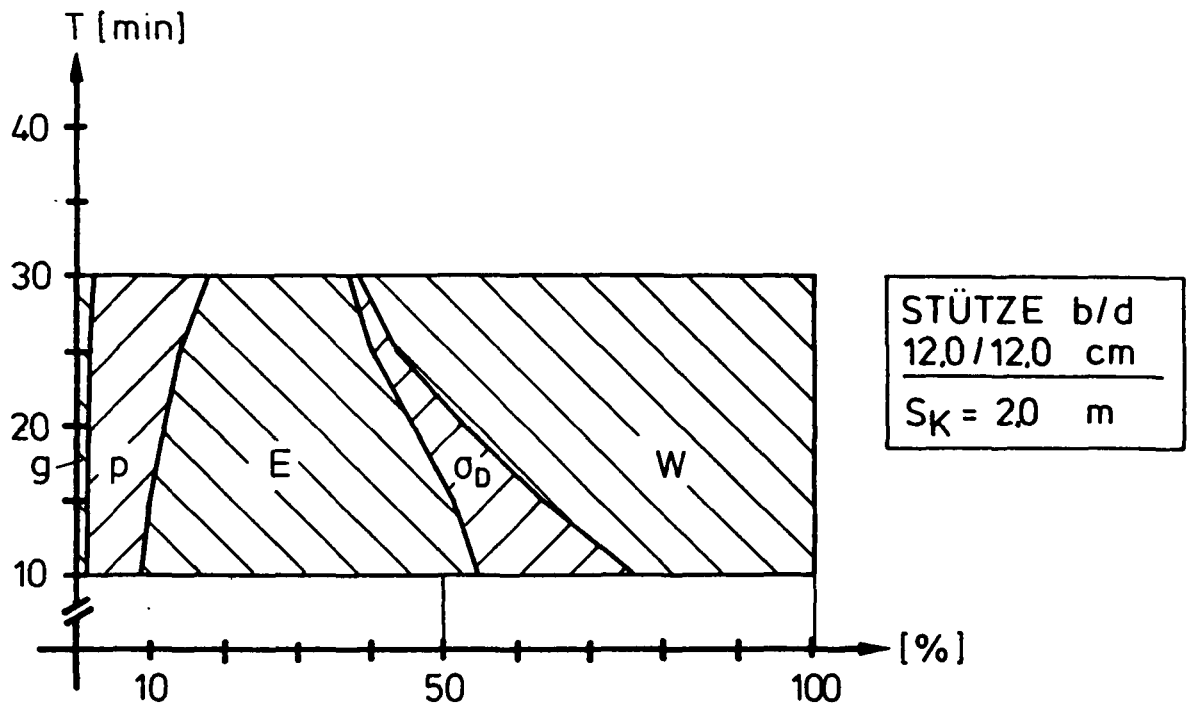


Bild 5.1

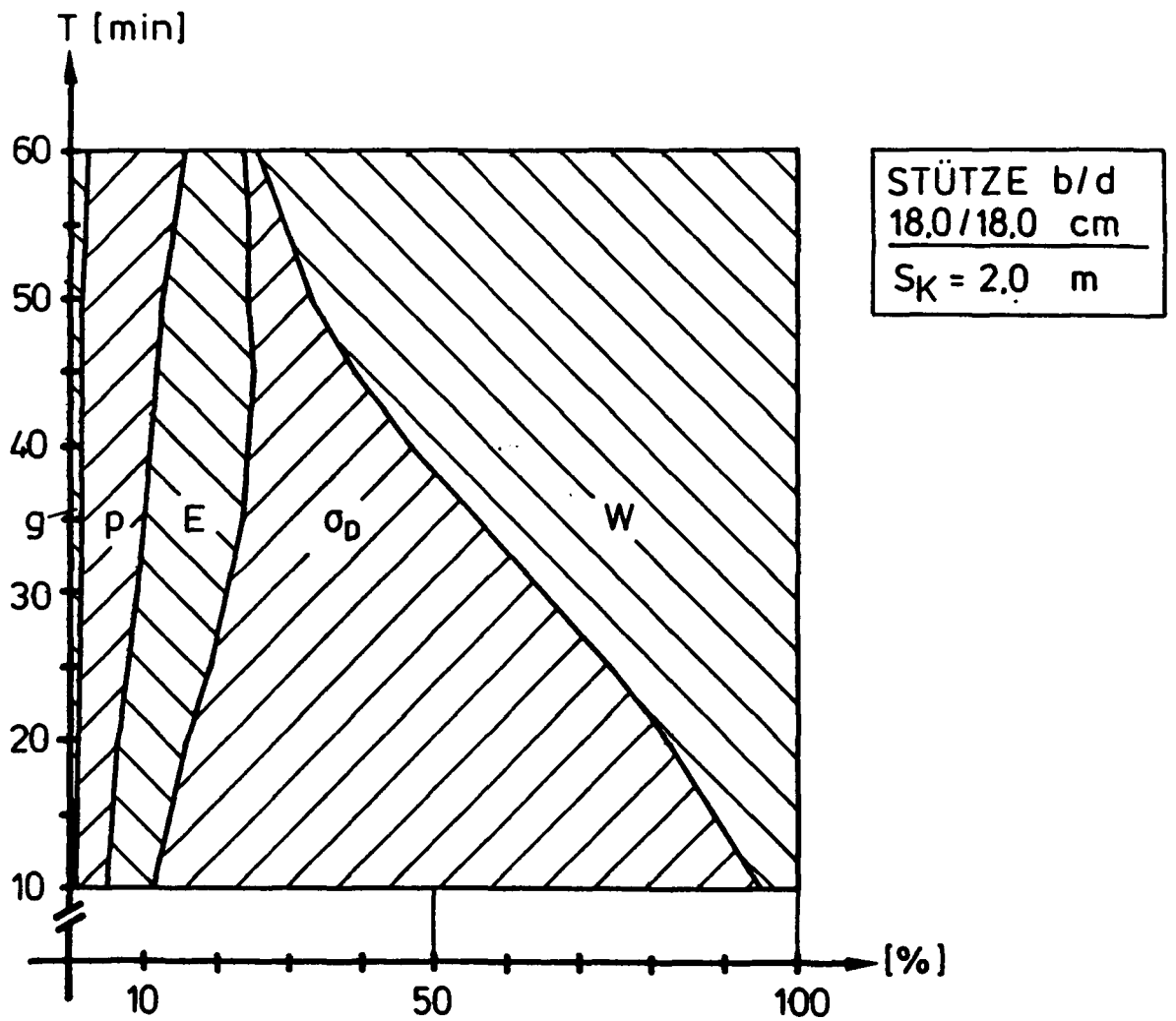
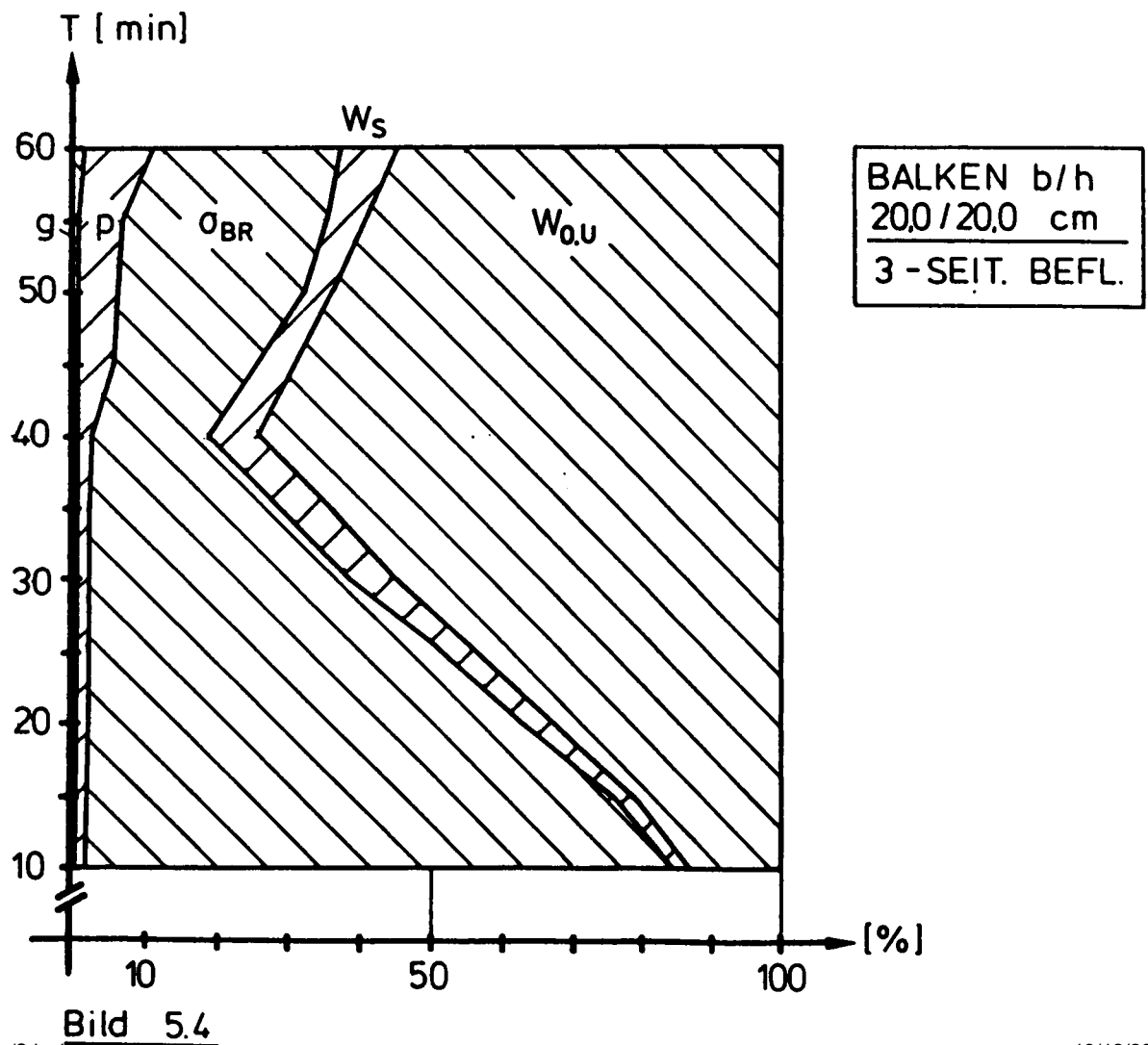
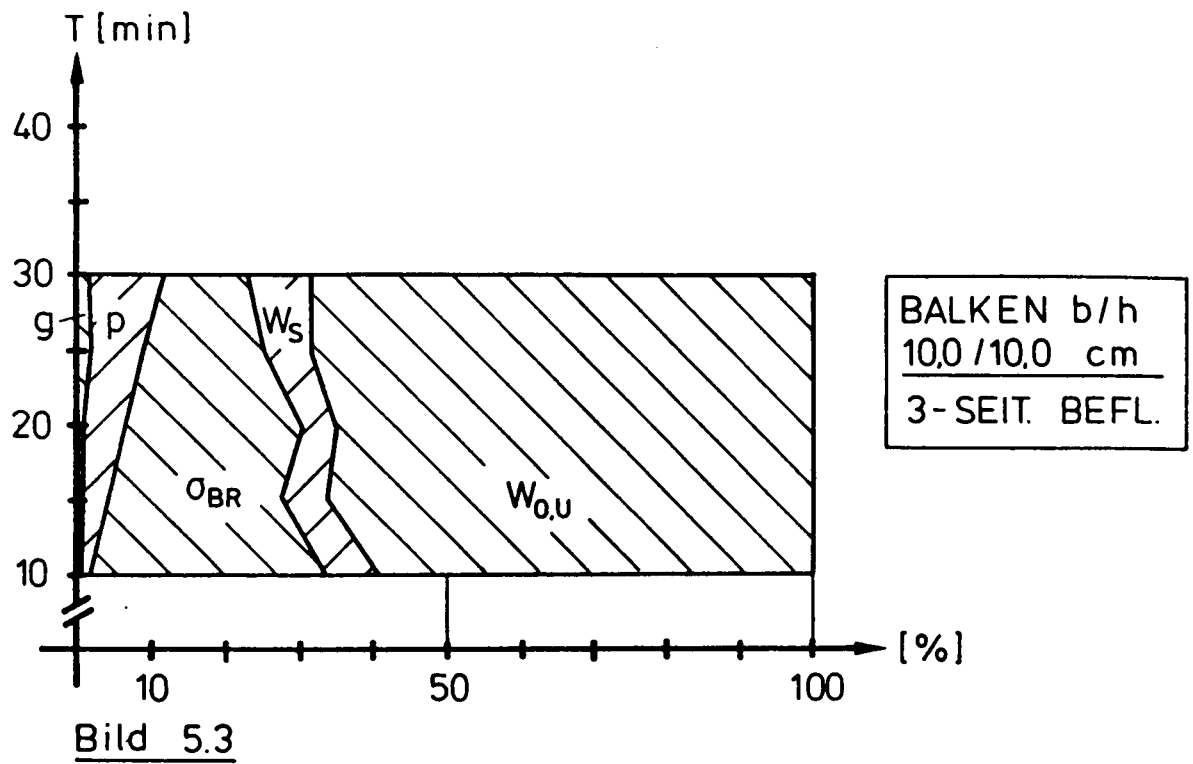


Bild 5.2



## 6. Einbeziehung "natürlicher Brände"

### 6.1 Berechnungsmodell nach Hadvig

Um einen Vergleich der zu erwartenden  $\beta$ -Werte bei einer Brandeinwirkung nach der ETK und einem "natürlichen Brand" durchführen zu können, ist es notwendig, die diesen natürlichen Brand steuernden, relevanten Parameter mit in die Rechnung einzubeziehen. Neben den Wärmedämmeigenschaften der den Brandraum umgebenden Bauteile handelt es sich hierbei im wesentlichen um die jeweils aktuelle Brandlast (i. allg. ausgedrückt in  $\text{MJ/m}^2$  Umfassungsfläche) und den Öffnungsfaktor  $F$ , der zur näherungsweisen Beschreibung der Ventilationsbedingungen des Brandraumes herangezogen wird. In /9/ werden die zu erwartenden Abbrandtiefen von Brettschichtholz in Abhängigkeit dieser Parameter aus der Auswertung zahlreicher Brandversuche angegeben. Dabei gilt:

$F$  = Entwurfsöffnungsfaktor,  $[\text{m}^{1/2}]$

$q$  = Entwurfsbrandlast,  $[\text{MJ/m}^2]$

$x$  = Abbrandtiefe,  $[\text{mm}]$

$\beta_0$  = Anfangswert der Abbrandrate,  $[\text{mm/Minute}]$

$t$  = Zeit,  $[\text{Minuten}]$

$\theta$  = Zeit bis zum Erreichen des maximalen Abbrandes

$$\theta = 0,0175 \frac{q}{F} \quad (6.1)$$

$$\beta_0 = 1,25 - \frac{0,035}{F + 0,021} \quad 0,02 \leq F \leq 0,3 \quad (6.2)$$

$$x = \beta_0 \cdot t \quad 0 \leq t \leq \theta/3 \quad (6.3)$$

$$x = \beta_0 \left( -\frac{1}{12}\theta + \frac{3}{2}t - \frac{3}{4}\frac{t^2}{\theta} \right) \quad \frac{\theta}{3} \leq t \leq \theta \quad (6.4)$$

In diesen Ansätzen erfolgt die Bestimmung der Abbrandtiefe in Abhängigkeit von der Entwurfsbrandlast  $q$  und dem Entwurfsöffnungsfaktor  $F$ . Die Wärmedämmeigenschaften der umgebenden Bauteile

werden dabei näherungsweise durch Umrechnung des geometrischen Öffnungsfaktors  $A \cdot \sqrt{h}/A_t$  mit einem dimensionslosen Faktor  $k$  berücksichtigt.

$$F = \frac{A \cdot \sqrt{h}}{A_t} k \quad (6.5)$$

mit:  $A$  = Gesamtöffnungsfläche,  $[m^2]$

$A_t$  = Gesamtumfassungsfläche,  $[m^2]$

$h$  = Gewichteter Mittelwert der vertikalen  
Wandöffnungen,  $[m]$

Ebenso kann nach /9/ bei der Entwurfsbrandlast verfahren werden.  
Hier ergibt sich:

$$q = q_0 \cdot k \quad (6.6)$$

Mit:  $q_0 = Q/A_t$ ,  $[MJ/m^2]$

$$Q = \text{Gesamtwärmemenge im Brandraum, } [MJ] \quad (6.7)$$

Nach /9/, Seite 32, Tabelle 2, liegt der Umrechnungsfaktor  $k$  je nach den Wärmedämmeigenschaften der umgebenden Wandbauteile zwischen 0,5 und 3,0. Für normale Brandräume im Wohnungsbau kann jedoch mit einem mittleren Faktor  $k$  von ca. 1,0 gerechnet werden. Sollten andere, von diesen mittleren Verhältnissen abweichende Eigenschaften der umgebenden Bauteile vorliegen, ist die Entwurfsbrandlast entsprechend unter Berücksichtigung eines von 1,0 unterschiedlichen  $k$ -Faktors zu bestimmen.

Die Unsicherheiten, welche bei der späteren Berechnung der  $\beta$ -Werte durch Streuungsanteile dieses  $k$ -Faktors entstehen könnten, werden in Anlehnung an das Fehlerfortpflanzungsgesetz durch eine etwas reichlichere Annahme der Brandlaststreuungen berücksichtigt.

Es muß jedoch bemerkt werden, daß die nach /9/ zu ermittelnden Abbrandfunktionen an kürzeren rechteckigen und unbelasteten Versuchskörpern gewonnen werden. Nun hat es sich bei den Auswertun-

gen zur Ermittlung der Abbrandfunktionen für Stützen und Balken nach /3/ gezeigt, daß besonders bei im Brandversuch belasteten Balkenquerschnitten - bedingt durch Abplatzerscheinungen der verkohlten Zonen an der Ober- und Unterseite dieser Querschnitte - in diesen Bereichen mit einer vergrößerten Abbrandrate zu rechnen ist. Erste Vergleichsrechnungen zu Beginn der hier durchgeführten Untersuchungen ergaben, daß eine unveränderte Übernahme nach den Ansätzen (6.1) - (6.4) für alle Balkenquerschnitte im Vergleich zur Brandeinwirkung nach der ETK extrem günstige Werte liefern würde. In /9/ wird zwar eine Vergrößerung der Abbrandfunktion am unteren Querschnittsrand von Balkenquerschnitten vorgesehen, doch nur für Abmessungen  $b \leq 8$  cm bei Rechteckquerschnitten und  $b \leq 5$  cm bei quadratischen Querschnitten. Offensichtlich ist diese Vergrößerung des Abbrandes aber nicht ausreichend. Aus diesem Grund werden die Ansätze nach /9/ dahingehend modifiziert, daß die danach berechneten Abbrandfunktionen für die Querschnittsseiten beibehalten, für den unteren und oberen Querschnittsrand jedoch analog den Ansätzen nach /3/ (vgl. Abschnitt 2.3) vergrößert werden.

Mit den Beziehungen (6.1) - (6.4) ist es nun möglich, die jeweiligen vorhandenen  $\beta$ -Werte auf der Basis der in Abschnitt 3 angegebenen Grundlagen unter Berücksichtigung der zusätzlichen Basisvariablen  $q$  und  $F$  zu berechnen.

## 6.2 Zu erwartende Brandlast bei Brandabschnitten im Wohnungsbau

Die Beschaffung von Daten zur Bestimmung der zu erwartenden Brandlasten im Wohnungsbau bereitet zur Zeit noch etwas Schwierigkeiten. Es sind zwar ausreichende Messungen der Brandbelastung in Industriegebäuden, Schulen, Kaufhäusern, Krankenhäusern und Hotels, also in Bauwerken, in denen von vornherein ein höheres Brandrisiko vermutet wird, vorhanden; ausreichende und gezielte Untersuchungen in Wohngebäuden liegen jedoch noch nicht in sehr umfangreichem Maße vor. Im einzelnen lassen sich jedoch folgende Angaben machen:

In /10/ wird für eine Schweizer Mietwohnung ein Mittelwert  $\bar{q}_g$  (auf die Grundfläche bezogen) von ca. 335 MJ/m<sup>2</sup> Grundfläche, jedoch ohne Angabe einer Standardabweichung ausgewiesen.

Nach /11/, Tabelle 5.9 F ergaben sich nach Umrechnung für einzelne Zimmer einer Wohnung folgende Werte:

	$\bar{q}_g$ [MJ/m <sup>2</sup> ] Grundfläche	$\sigma_{qg}$ [MJ/m <sup>2</sup> ] Standardabweichung	$v_q$ [%]
Wohnzimmer	354	102	29
Aufenthaltsraum	254	59	23
Schlafzimmer	390	104	26
Esszimmer	327	93	28
Küche	291	70	24
Mittelwerte	323	85,6	26

Dabei wird als zu erwartende Verteilung eine log. Normalverteilung angegeben.

Andere Werte werden in den Veröffentlichungen /12/ und /13/ angegeben. Diese Untersuchungen gehen im wesentlichen auf /15/ zurück und werden auch von anderen Autoren wiederholt zitiert. Bei diesen schwedischen Messungen ergibt sich ein  $\bar{q}_t$  [MJ/m<sup>2</sup>] (auf die Brandraumbooberfläche bezogen) von:

	$\bar{q}_t$	$\bar{\sigma}_{qt}$	$v_{qt}$
a) 2 Räume und Küche	150	24,7	16,0 %
b) 3 Räume und Küche	139	21	15,0 %



In /14/ werden diese Werte auf einen Brandraum von  $3,2 \cdot 4,3 \cdot 2,6 \text{ m}^3$  umgerechnet. Dann ergeben sich jedoch Brandlasten  $\bar{q}_g$  von ca.

- a)  $727 \text{ MJ/m}^2$
- b)  $673 \text{ MJ/m}^2$ ,

also ungefähr die doppelten Werte, wie in /10/ und /11/ angegeben.

Eine weitere Angabe befindet sich in /9/; hier wird für Norwegen ein  $\bar{q}_g$ -Wert von  $440 - 480 \text{ MJ/m}^2$  angeführt.

Bei Brandversuchen wurde nach /17/ bei mittlerer Möblierung im Wohn-, Schlaf- und Kinderzimmer eine mittlere Brandlast  $\bar{q}_g$  von ca.  $530 \text{ MJ/m}^2$  gemessen. Wie in /9/ wurde jedoch auch für diese Messungen keine Standardabweichungen bzw. Variationskoeffizienten angegeben.

Des weiteren wird in /16/ im Vergleich mit Kraftfahrzeugbränden ein Brandlastmittelwert  $\bar{q}_g$  von ca.  $420 - 500 \text{ MJ/m}^2$  für Wohnräume - wiederum jedoch ohne Angabe von Verteilungsparametern - aufgeführt.

Diese Literaturdurchsicht zeigt, daß in bezug auf die Größe von Brandbelastungen in Wohngebäuden noch keine einheitlichen Angaben vorliegen. Die aufgelisteten Werte können je nach Erhebungsland um bis zu ca. 100 % voneinander abweichen. Aus diesem Grund soll in der folgenden Auswertung auch unter Berücksichtigung der Tatsache, daß es sich bei den angegebenen Werten zum Teil nur um die Angabe der mobilen Brandlasten handelt, die Berechnung des vorhandenen  $\beta$ -Wertes für verschiedene Entwurfsbrandlasten von

$$\bar{q}_t = 150 - 450 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$$

durchgeführt werden. Damit erfolgt die Auswertung für eine minimale Brandlast in Anlehnung an die Angaben in /12, 13/, die offensichtlich die umfangreichste Auswertung darstellt.

Die Begrenzung der Auswertungen auf eine untere Entwurfsbrandlast von  $\bar{q}_t = 150 \text{ MJ/m}^2$  wird außerdem vorgenommen, um für den angesetzten Untersuchungsbereich der Öffnungsfaktoren (vgl. Abschnitt 6.3) noch maximal Abbrandzeiten  $\theta$  (vgl. 6.1) zu bekommen, die eine sinnvolle Auswertung für die Feuerwiderstandsklassen F30-B und F60-B ermöglichen. Bei geringeren Brandlasten und der Wahl realistischer Öffnungsfaktoren wird sonst der maximale Abbrand schon vor Ablauf dieser Zeiten erreicht, so daß ein direkter Vergleich der erzielten  $\beta$ -Werte zu diesen Zeitpunkten nicht mehr möglich ist.

Als Variationskoeffizient soll hier 25 % angenommen werden, obwohl für die Messungen in /12, 13/ nur ein mittlerer Variationskoeffizient von 15 - 16 % angegeben wird. Dies berücksichtigt die Tatsache, daß bei Ermittlung der Entwurfsbrandlast auch noch Einflüsse aus den Wärmedämmeigenschaften der umgebenden Wände gemäß Abschnitt 6.1 näherungsweise berücksichtigt werden müssen. Als Verteilungstyp soll in Anlehnung an /11/ eine Log.-Normalverteilung zur Anwendung kommen.

### 6.3 Öffnungsfaktor - Annahmen

In einem konkreten Brandfall hat eine etwas genauere Überprüfung der Brandraumrandbedingungen zu erfolgen. Dies beinhaltet auch die Bestimmung des Öffnungsfaktors  $F$  in Abhängigkeit der vorliegenden Raumgeometrie.

Ebenso wie die Ermittlungen der  $\beta$ -Werte nur für verschiedene zu erwartende Entwurfsbrandlasten  $q$  sinnvoll sind - wie aus den Auswertungen nach Abschnitt 6.2 hervorgeht - müssen diese auch für eine Reihe möglicher Öffnungsfaktoren  $F$  durchgeführt werden.

Dabei werden für  $F$  folgende statistische Annahmen getroffen:

Alle möglichen Schwankungen aus der Einbeziehung aller evtl. vorhandenen Wand- und Deckenöffnungen in der Berechnung von  $F$  werden

auf der sicheren Seite liegend in der Annahme eines Variationskoeffizienten von

$$v_F = 20 \%$$

zusammengefaßt.

Um die Verteilung nach unten hin zu begrenzen, wird eine log. Normalverteilung angesetzt.

Die in die spätere Auswertung einbezogenen Mittelwerte beschreiben einen Bereich von  $F = 0,04 \text{ m}^{1/2}$  bis maximal  $F = 0,26 \text{ m}^{1/2}$ .

Die obere Grenze ergibt sich aus der Definition von  $\theta$  (Gl. 6.1), da für größere F-Werte analog zur Wahl der kleinsten Brandlast (s. Abschn. 6.2) die Zeit des maximalen Abbrandes  $\theta$  unterhalb des jeweils untersuchten Zeitpunktes liegen würde und somit nicht in die Vergleichsrechnungen einbezogen werden kann.

Nach Gl. (6.2) muß  $F \geq 0,02$  sein. Bedingt durch vorgeschriebene Mindestöffnungsflächen ( $1/8$  der Grundfläche als Fensteröffnungen gem. den Bauordnungen) kann ein kleinster Öffnungsfaktor von  $0,04 \text{ m}^{1/2}$  als realistisch bezeichnet werden, zumal im Vorgriff auf die Auswertungen in Abschn. 6.5 mögliche  $\beta$ -Werte für  $F \leq 0,04$  nicht mehr interessant sind.

Ein weiterer Hinweis auf die Größe des zu erwartenden Öffnungsfaktors kann /13/ entnommen werden. Für die dort aufgeführten Beispiele werden Faktoren angegeben und berechnet, welche überwiegend im Bereich von  $F \geq 0,04 \text{ m}^{1/2}$  bis  $F \leq 0,12 \text{ m}^{1/2}$  liegen und somit als ein realistischer Anhalt für die zu erwartenden Öffnungsfaktoren dienen können.

#### 6.4 Wahl der untersuchten Querschnitte

Wie aus der Berechnung der  $\beta$ -Werte für eine Brandeinwirkung gemäß ETK hervorgeht (vgl. Tabellen 5.5 und 5.6), läßt sich für die ausgewählten und untersuchten Querschnitte kein einheitliches Sicherheitsniveau nachweisen, auf dessen Grundlage ein Vergleich der beim "natürlichen Brand" ermittelten  $\beta$ -Werte hätte durchgeführt werden können. Aus diesem Grund soll der Vergleich individuell für einzelne ausgesuchte Stützen- und Balkenquerschnitte erfolgen. Um jedoch den dazu notwendigen Rechenaufwand in erträglichen Grenzen zu halten, erscheint es nicht notwendig, alle in den Tabellen 5.1 und 5.3 aufgeführten Stützen- und Balkenquerschnitte bei der Berechnung zu berücksichtigen. Betrachtet man die ermittelten  $\beta$ -Werte für Brandeinwirkungen nach der ETK (vgl. Tabellen 5.5 und 5.6), läßt sich feststellen, daß für die quadratischen Querschnitte bei den Stützen und Balken die jeweils kleineren  $\beta$ -Werte ermittelt werden. Aus diesem Grund soll sich die weitere Auswertung auch nur auf die aufgeführten quadratischen Querschnitte beschränken, wobei jedoch jeweils ein Rechteckquerschnitt je Bauteil und Branddauer, und zwar derjenige mit dem geringsten  $\beta$ -Wert, repräsentativ mit in die Auswertung einbezogen werden soll. Damit ergeben sich die in den Tabellen 6.1 und 6.2 auf Seite 34 zusammengestellten, weiter zu untersuchenden Querschnitte.

Gleichzeitig werden in diesen Tabellen die Bildnummern der entsprechenden Darstellungen mit angegeben. Um den erläuternden Text nicht zu sehr zu unterbrechen, wird nur die Darstellung der  $\beta$ -Verläufe in den Bildern 6.1 und 6.2 für Stützen sowie 6.11 und 6.12 für Balken in Abschnitt 6.5 in den Text exemplarisch mit aufgenommen. Die übrigen Darstellungen der berechneten  $\beta$ -Verläufe befinden sich im Anhang.

	$\sigma_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$s_k$ [m]	b/d [cm]	Darstellung in
F30-B	11	2	16 /16	Bild 6.1
		5	18,4/18,4	Bild 6.2
	5	2	12 /12	Bild 6.3
		5	13,2/13,2	Bild 6.4
F60-B	11	2	24 /24	Bild 6.5
		5	30 /30	Bild 6.6
	5	2	18 /18	Bild 6.7
		5	21 /21	Bild 6.8
F30-B	11	5	16,4/32,8	Bild 6.9
F60-B	11	5	27,4/54,8	Bild 6.10

Tabelle 6.1: Kennwerte der untersuchten Holzstützen

	$\sigma_{BR}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Befl.	b/h [cm]	Darstellung in
F30-B	14	3	18 /18	Bild 6.11
		4	24 /24	Bild 6.12
	7	3	10 /10	Bild 6.13
		4	15 /15	Bild 6.14
F60-B	14	3	36 /36	Bild 6.15
		4	48 /48	Bild 6.16
	7	3	20 /20	Bild 6.17
		4	30 /30	Bild 6.18
F30-B	14	3	8,5/34	Bild 6.19
F60-B	7	3	10,5/66	Bild 6.20

Tabelle 6.2: Kennwerte der untersuchten Holzbalken

### 6.5 Berechnete $\beta$ -Verläufe

In den Abbildungen 6.1 bis 6.20 wurden die für die in den Tabellen 6.1 und 6.2 angegebenen Stützen- und Balkenquerschnitte berechneten  $\beta$ -Werte dargestellt. Um einen direkten Vergleich mit den für eine Brandeinwirkung nach der ETK ermittelten  $\beta$ -Werten durchführen zu können, wurden die Untersuchungen wiederum für die Brandzeitpunkte  $t = 30$  und  $t = 60$  min durchgeführt; außerdem wurde der für die Brandeinwirkung nach der ETK ermittelte  $\beta$ -Wert als Vergleichsniveau mit eingezeichnet. Als Kurvenparameter diente zur Darstellung der  $\beta$ -Werte in Abhängigkeit vom jeweiligen Öffnungsfaktor die Entwurfsbrandlast.

Der rechte, in den Bildern 6.1 bis 6.20 durch die gestrichelte Linie abgetrennte Bereich der Kurvenverläufe stellt diejenigen Parameterkombinationen dar, bei welchen der Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Verkohlungstiefe unter dem des betrachteten relevanten Zeitpunktes - beschrieben durch die Beziehung in Gl. (6.1) - liegt. Diese Parameterkombinationen werden somit im Rahmen dieser Untersuchungen nicht weiter mit berücksichtigt.

Wie sich aus den Darstellungen in den Abbildungen 6.1 bis 6.10 entnehmen läßt, ergibt sich in bezug auf die Verläufe der  $\beta$ -Werte ein ziemlich einheitliches Gesamtbild. Je nach der vorhandenen Brandbelastung zeigen die jeweiligen Kurvenverläufe der berechneten  $\beta$ -Werte ein relatives Minimum bei jeweils leicht unterschiedlichen Öffnungsfaktoren  $F$ . Dieses relative Minimum liegt je nach Brandlast ungefähr im Bereich  $F > 0,06$  bis  $F < 0,12$ , wobei sich der jeweilige  $\beta$ -min-Wert bei der Parameterkombination der optimalen Verbrennung einstellt. Der Bereich der kleineren Öffnungsfaktoren kann als ein ventilationsgesteuerter Brand mit geringerer Wärmeentwicklung und der Bereich größerer Öffnungsfaktoren als brandlastgesteuerter Brand mit großem Wärmeabzug durch die vorhandenen Öffnungen interpretiert werden. Außerdem ergibt sich aus den Verläufen der  $\beta$ -Werte, daß der Bereich kleinerer Öffnungsfaktoren ( $F < 0,04$ ) im Rahmen der Gesamtbetrachtung nicht relevant ist.

Des weiteren zeigt sich, daß das durch eine Brandeinwirkung nach der ETK vorgegebene Sicherheitsniveau bei den Holzstützen mit einer Brandeinwirkungsdauer von 30 min ziemlich einheitlich bei einer maximalen Brandlast von ca. 200 MJ/m<sup>2</sup> im Bereich von  $\beta$ -min unterschritten wird. Bei einer Brandeinwirkungsdauer von 60 min liegt dieser maximal zulässige Brandlastwert bei ca. 275 - 300 MJ/m<sup>2</sup>.

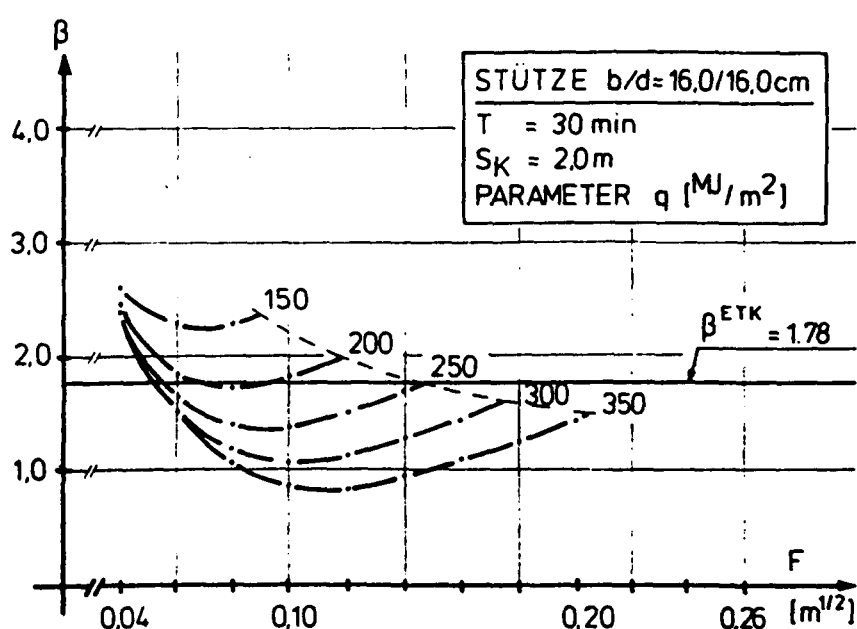


Bild 6.1

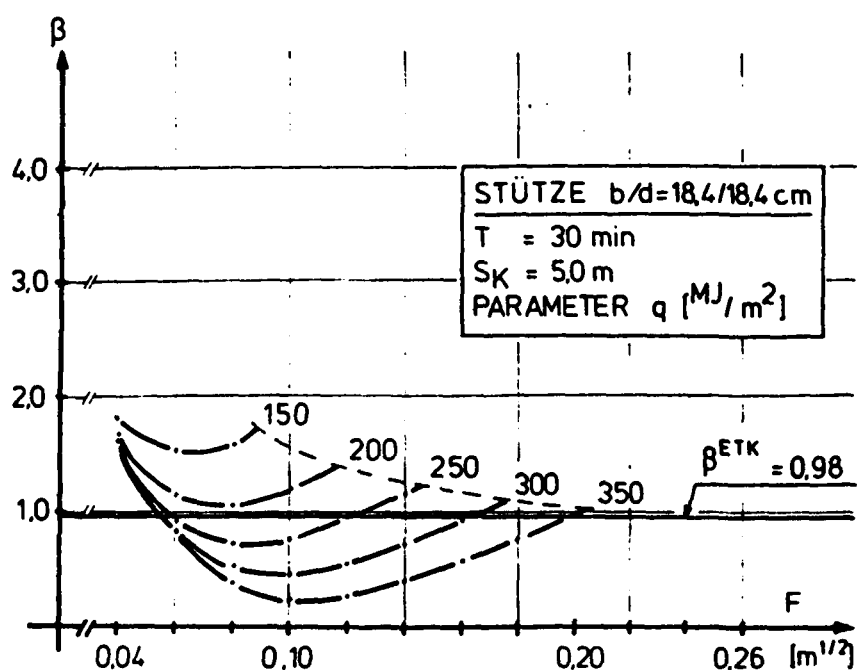


Bild 6.2

Bei den Balkenquerschnitten (vgl. Bilder 6.11 und 6.12) ergibt sich bezüglich der maximal zulässigen Brandlast ein etwas anderes Bild. Zwar sind die prinzipiellen Kurvenverläufe mit denen der Stützenquerschnitte vergleichbar; die maximal zulässigen Brandlasten liegen jedoch wesentlich höher ( $> 450 \text{ MJ/m}^2$  bei einer Brandeinwirkungsdauer von 30 bzw. 60 min). Diese relativ hohe Vergleichslast bis zum Unterschreiten des durch die Brandeinwirkung nach der ETK vorgegebenen Sicherheitsniveaus kommt trotz der in Abschnitt 6.1 vorgenommenen verschärfenden Annahmen für die Abbrandfunktion bei Balken durch die immer noch vergleichsweise günstigere Beurteilung von Balkenquerschnitten gemäß dem Abbrandmodul nach /9/ im Vergleich zur Brandeinwirkung nach der ETK zustande.

Da weitergehende Untersuchungen auf diesem Gebiet fehlen, kann eine abschließende Klärung dieses Sachverhaltes an dieser Stelle nicht erfolgen. Wegen dieser Tatsache wird deshalb vorgeschlagen, bei allgemeingültigen Aussagen vorerst die etwas konservativen Ergebnisse bezüglich der maximal zulässigen Brandlast bei den Holzstützen heranzuziehen.



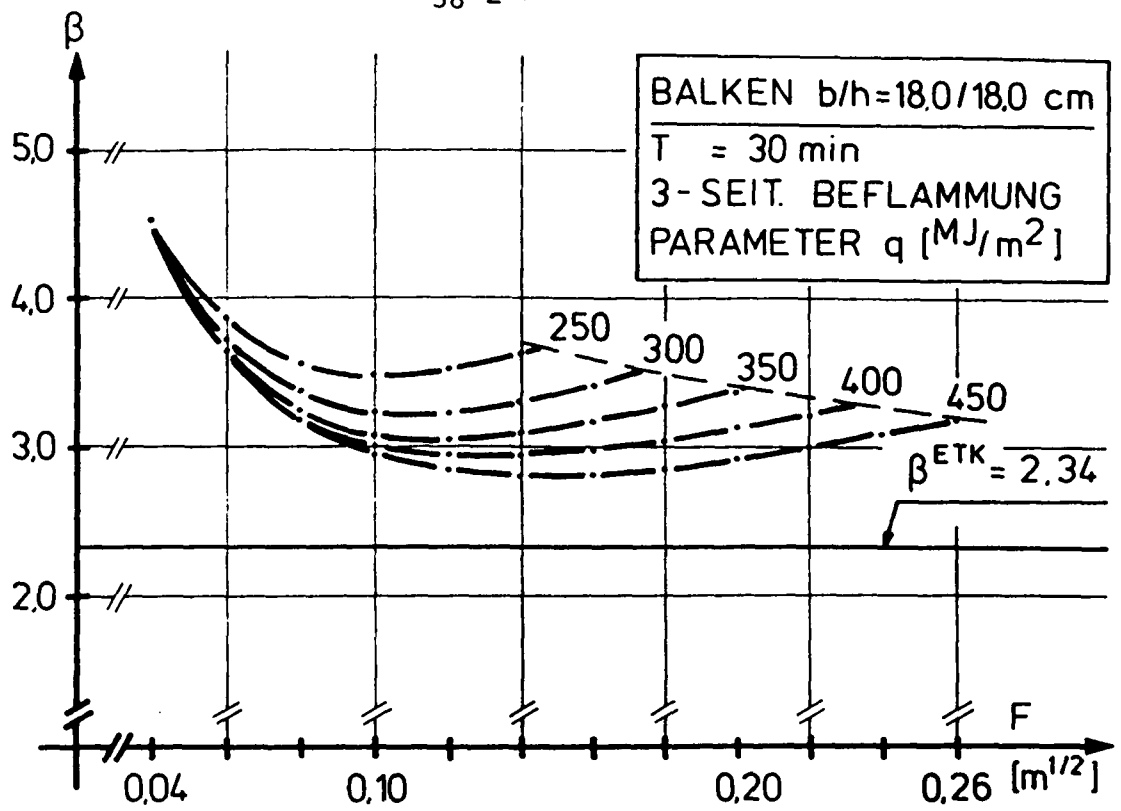


Bild 6.11

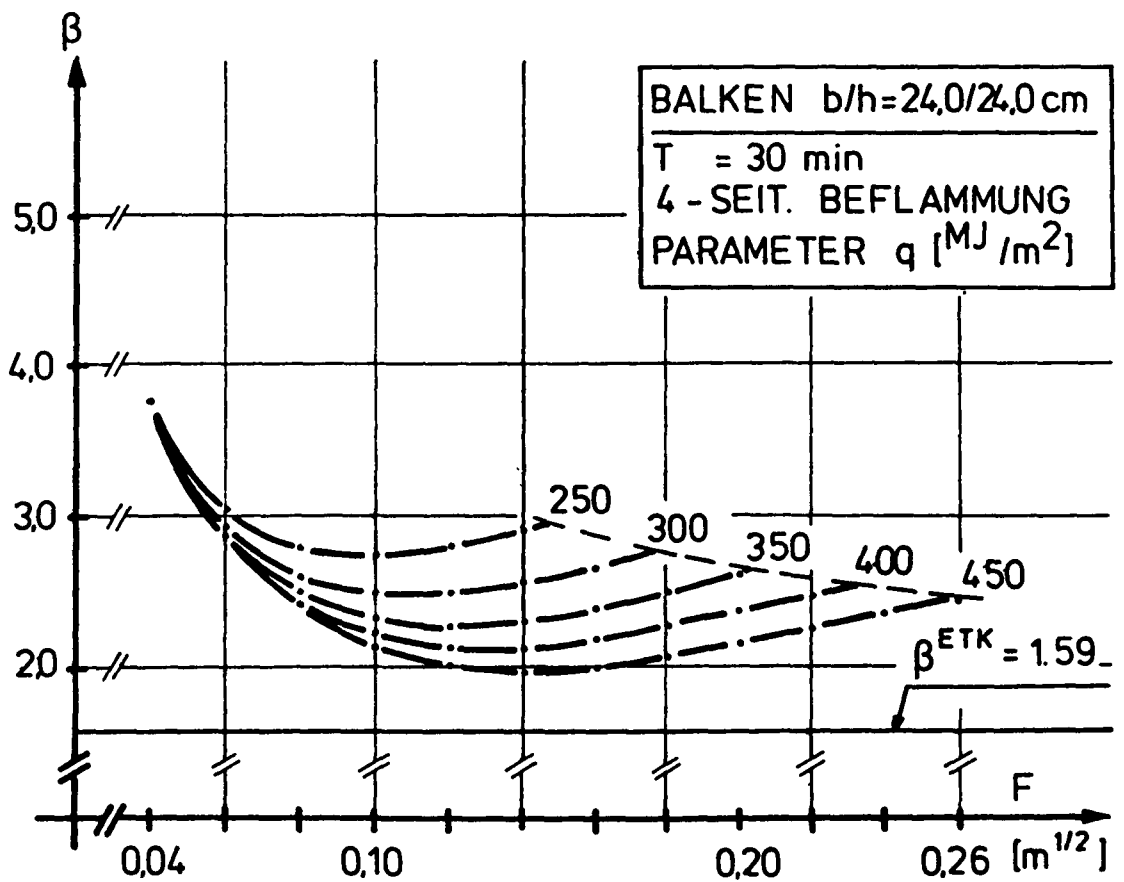


Bild 6.12

#### 6.6 Berechnung der Einzelanteile an der Gesamtstreuung der Sicherheitszone ("natürlicher Brand")

In Analogie zu Abschnitt 5.3 sollen auch für die in den vorangehenden Untersuchungen angenommenen Verhältnisse die Anteile der Basisvariablen an der Gesamtstreuung der Sicherheitszone nach Gleichung (5.1) berechnet werden. Diese Werte stehen bei dem angewendeten Rechenprogramm ohnehin als die Ableitungen am Mittelwert nach den jeweiligen Basisvariablen des ersten Iterations-schrittes zur Berechnung der  $\beta$ -Werte zur Verfügung. Exemplarisch werden für eine Auswahl von Querschnitten und Brandlasten diese prozentualen Anteile für Stützen- und Balkenquerschnitte bei einer Branddauer von  $t = 30$  min bzw.  $t = 60$  min in Abhängigkeit der jeweils maßgebenden Öffnungsfaktoren aufgetragen.

Abgesehen von rechentechnischen Ungenauigkeiten, die sich bei der Bildung von numerischen Ableitungen kaum vermeiden lassen, ergibt sich doch für die untersuchten Stützen- und Balkenquerschnitte ein ziemlich einheitliches Verhalten. Bei den Stützenquerschnitten (vgl. Bilder 6.21 und 6.24) zeigt sich eine sehr ausgeprägte Zunahme des Streuungsanteiles der Brandlast mit steigendem Öffnungsfaktor  $F$ . Bei  $F = 0,04 \text{ m}^{1/2}$  ist der Einfluß der Brandlasten vernachlässigbar. Die zugehörigen Sicherheitsindizes  $\beta$  haben für diesen Öffnungsfaktor bei allen Brandlasten den gleichen Wert (s. Abb. 6.1 - 6.10). Dieser Zusammenhang spiegelt den Bereich eines ventilationsgesteuerten Brandablaufes wider. Die Anteile des Öffnungsfaktors selbst zeigen jedoch einen unterschiedlichen Verlauf. Während die Anteile an der Gesamtstreuung bei kleinen Öffnungsfaktoren recht erheblich sind ( $\sim 40 - 50 \%$ ), nehmen diese mit steigendem Öffnungsfaktor stetig ab, zeigen dann jedoch wieder einen etwas ansteigenden Verlauf. Im Vergleich mit den entsprechenden Verläufen der  $\beta$ -Werte (vgl. Abb. 6.1 - 6.10) ist festzustellen, daß der Bereich der maximalen Einschnürung der  $F$ -Anteile an der Gesamtstreuung mit dem Bereich der minimalen  $\beta$ -Werte zusammenfällt. Dies gibt den schon bei der Berechnung der  $\beta$ -Verläufe festgestellten Sachverhalt wieder, daß ein Bereich optimaler Verbrennung existiert, bei welchem eine kleinere Ver-

änderung des Öffnungsfaktors nur einen unwesentlichen Einfluß auf das vorhandene Sicherheitsniveau zeigt. Die Anteile der Abbrandrate  $w$  an der Gesamtstreuung liegen zwischen ca. 10 und 50 %. Wie aus den Abbildungen 6.21 bis 6.24 zu ersehen ist, steigt dieser Anteil bis zum Erreichen des "optimalen Öffnungsfaktors" an, um dann mit zunehmendem Öffnungsfaktor auf einen Wert von ca. 10 % abzufallen; in diesem Bereich wird der Hauptstreuungsanteil von der vorhandenen Brandlast  $q$  beigesteuert.

Des weiteren läßt sich aus den vorgenannten Abbildungen erkennen, daß die Anteile an der Gesamtstreuung aus dem Eigengewicht, der Verkehrslast, der Druckfestigkeit und dem E-Modul des Holzes verhältnismäßig gering sind. Daraus ergibt sich, daß eine weitere Berücksichtigung temperaturabhängiger Parameter bei den Werkstoffkenngrößen keinen wesentlichen Einfluß auf die Berechnungsergebnisse hat. Dieser, sich aus den vorgenannten Abbildungen ergebende Sachverhalt kann nunmehr als nachträgliche Rechtfertigung der vereinfachenden Modellannahmen für Holzstützen nach Abschnitt 22 gelten.

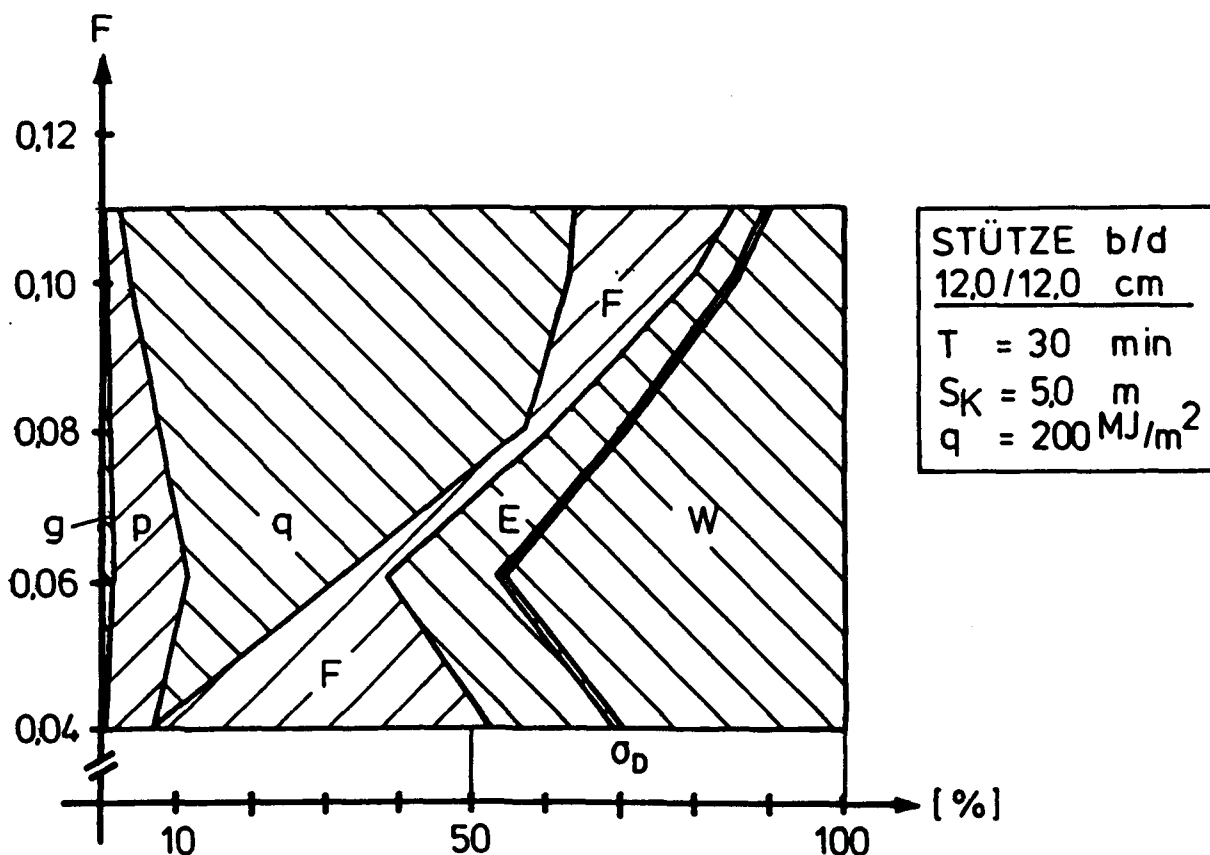


Bild 6.21

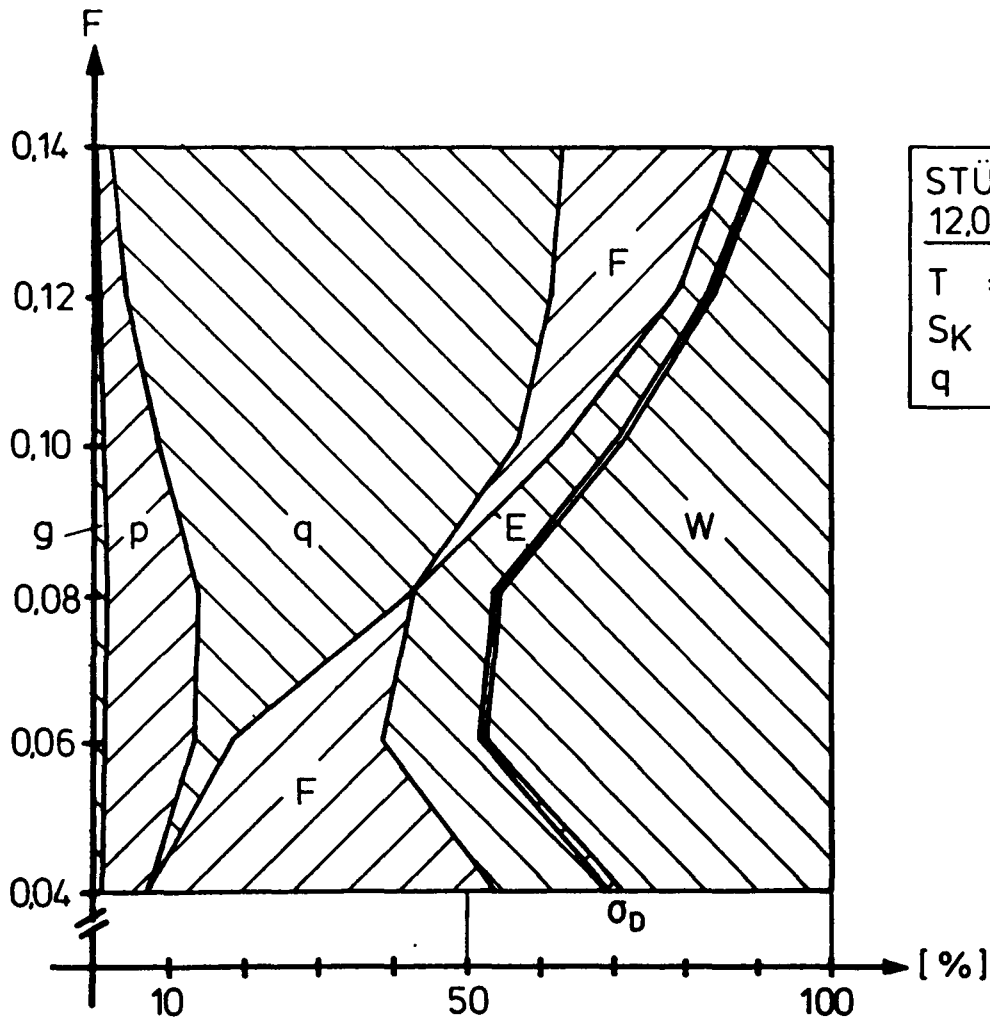


Bild 6.22

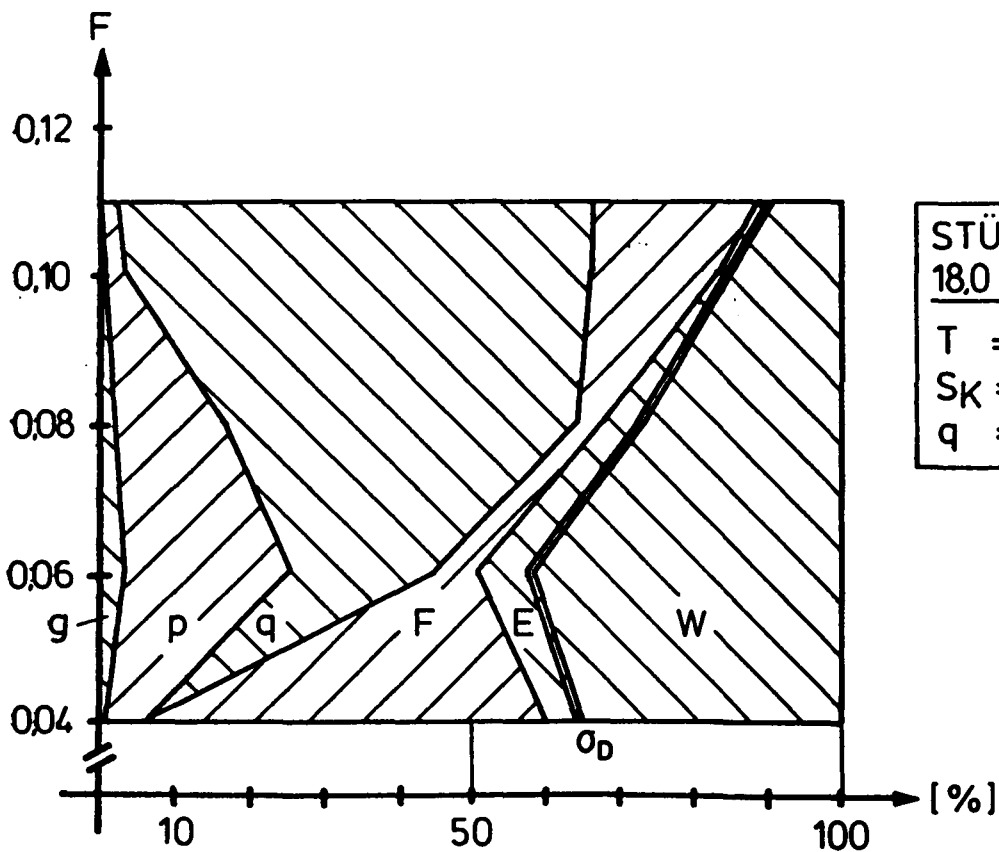
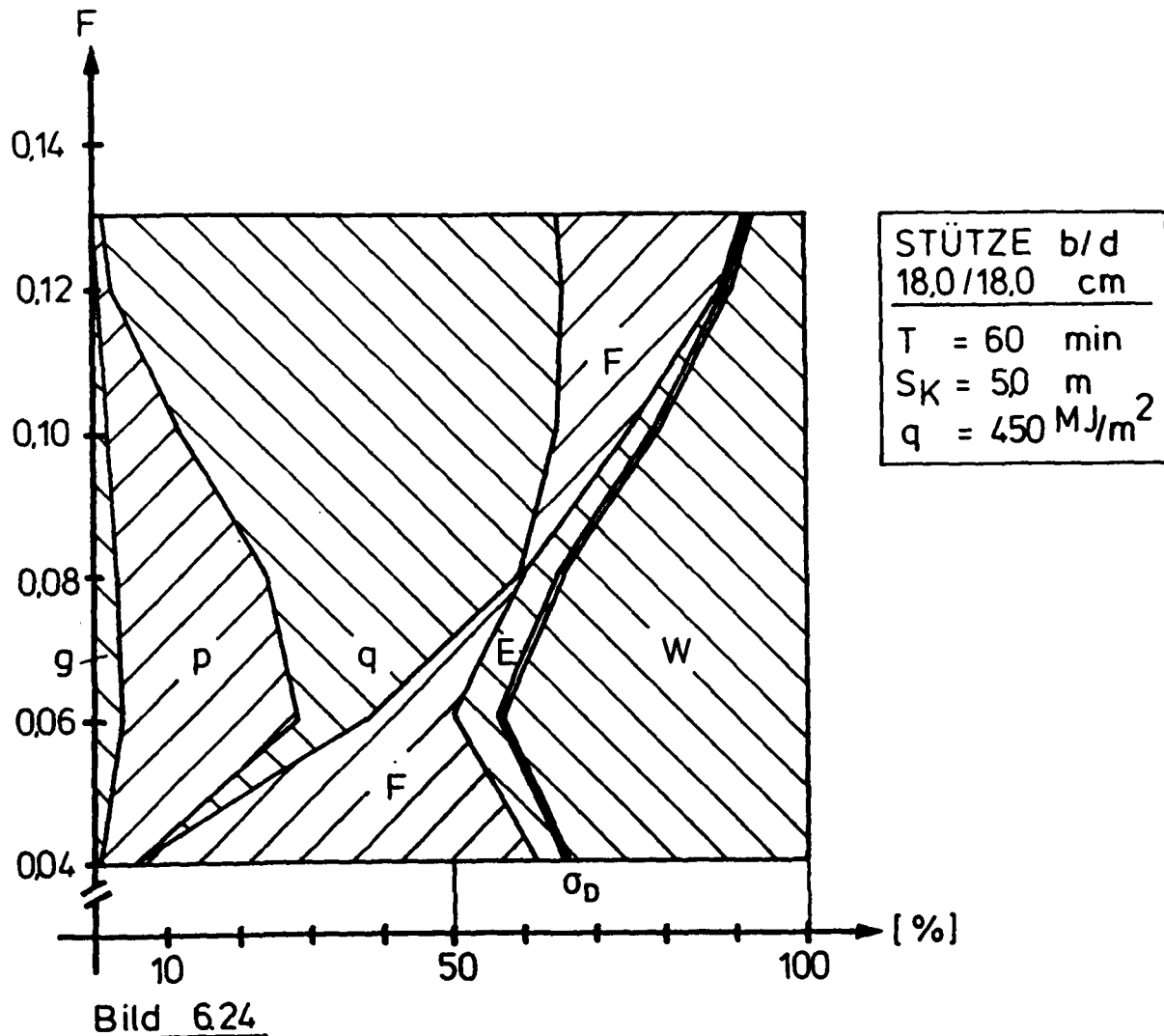


Bild 6.23



Ähnlich den Berechnungsergebnissen bei Holzstützen stellt sich die Situation bei den Balkenquerschnitten dar. Auch hier liegt mit zunehmendem Öffnungsfaktor ein steigender Anteil an der Gesamtstreuung aus der Brandlast vor, welcher jedoch nicht die gleiche Größenordnung wie bei den Holzstützen erreicht. Für die kleinsten Öffnungsfaktoren verschwindet der Einfluß von  $q$ , was auch hier in gleichen Sicherheitsindizes  $\beta$  für alle Brandlasten resultiert. Desgleichen ist eine Einschnürung des Einflusses der Öffnungsfaktoren vorhanden, dessen Bereich wie bei den Stützen mit dem Bereich der Kurvenminima der  $\beta$ -Verläufe zusammenfällt (vgl. Abb. 6.11 - 6.20). Dagegen gewinnt der Anteil des unteren

Querschnittsabbrandes bei den Balkenquerschnitten etwas an Bedeutung, da diese Basisvariable über das Widerstandsmoment des Querschnitts in der dritten Potenz in das Bemessungsmodell eingeht. Wie auch bei den Stützenquerschnitten tragen die übrigen Basisvariablen dann nur noch geringere Anteile zur Gesamtstreuung bei. Erwähnt werden sollte jedoch noch, daß im Gegensatz zu dem verschwindend geringen Anteil aus  $\sigma_{D}$  bei den Holzstützen der Anteil aus  $\sigma_{BR}$  bei den Balkenquerschnitten im Bereich von 10 - 20 % liegen kann. Trotzdem erscheint es auch in Anbetracht dieser Größenordnung noch nicht notwendig, Temperatureinflüsse bei der Basisvariablen  $\sigma_{BR}$  gesondert zu berücksichtigen, da - wie auch schon bei den Holzstützen erwähnt - der Einfluß auf das endgültige Ergebnis gering ist.

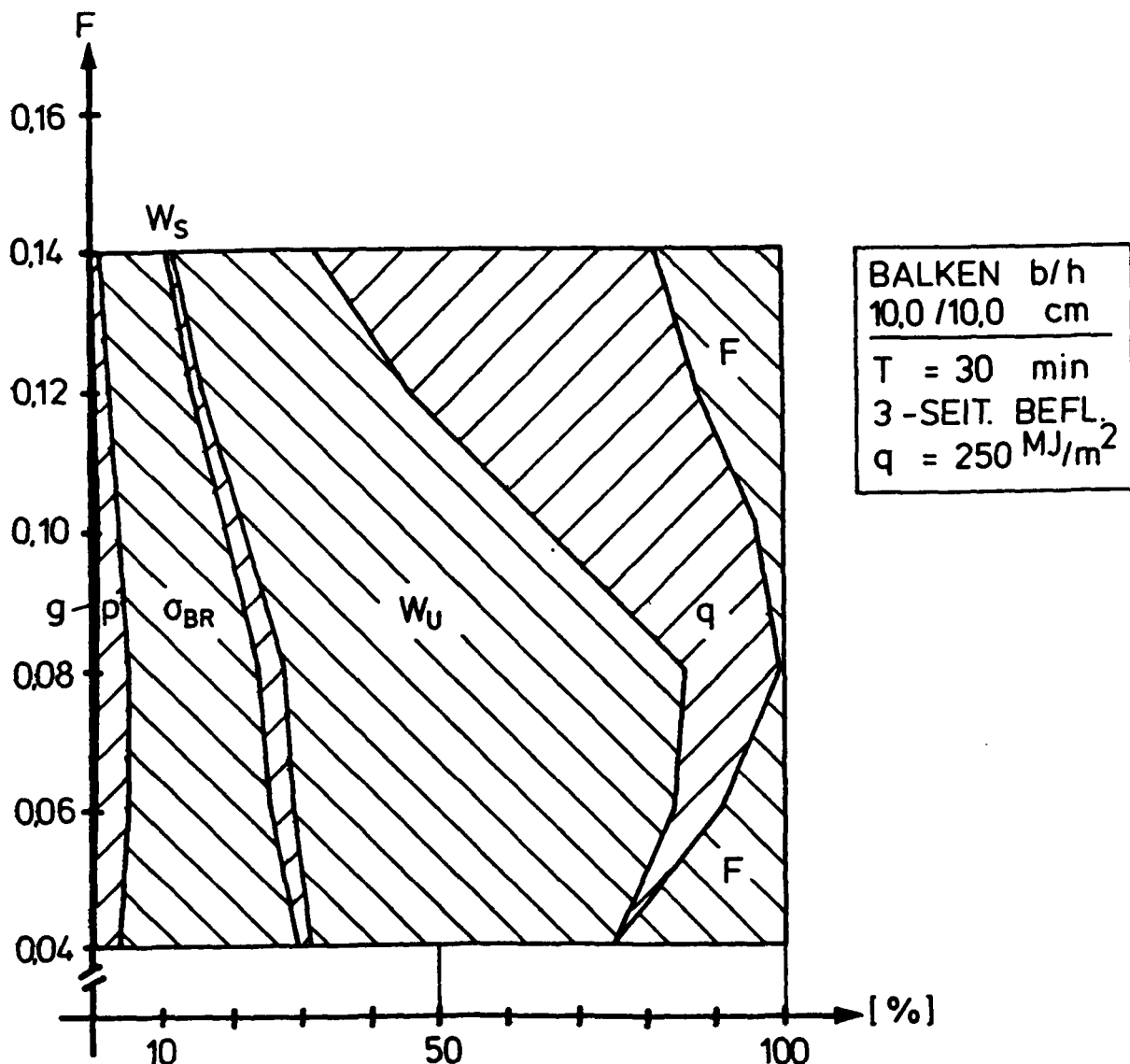


Bild 6.25

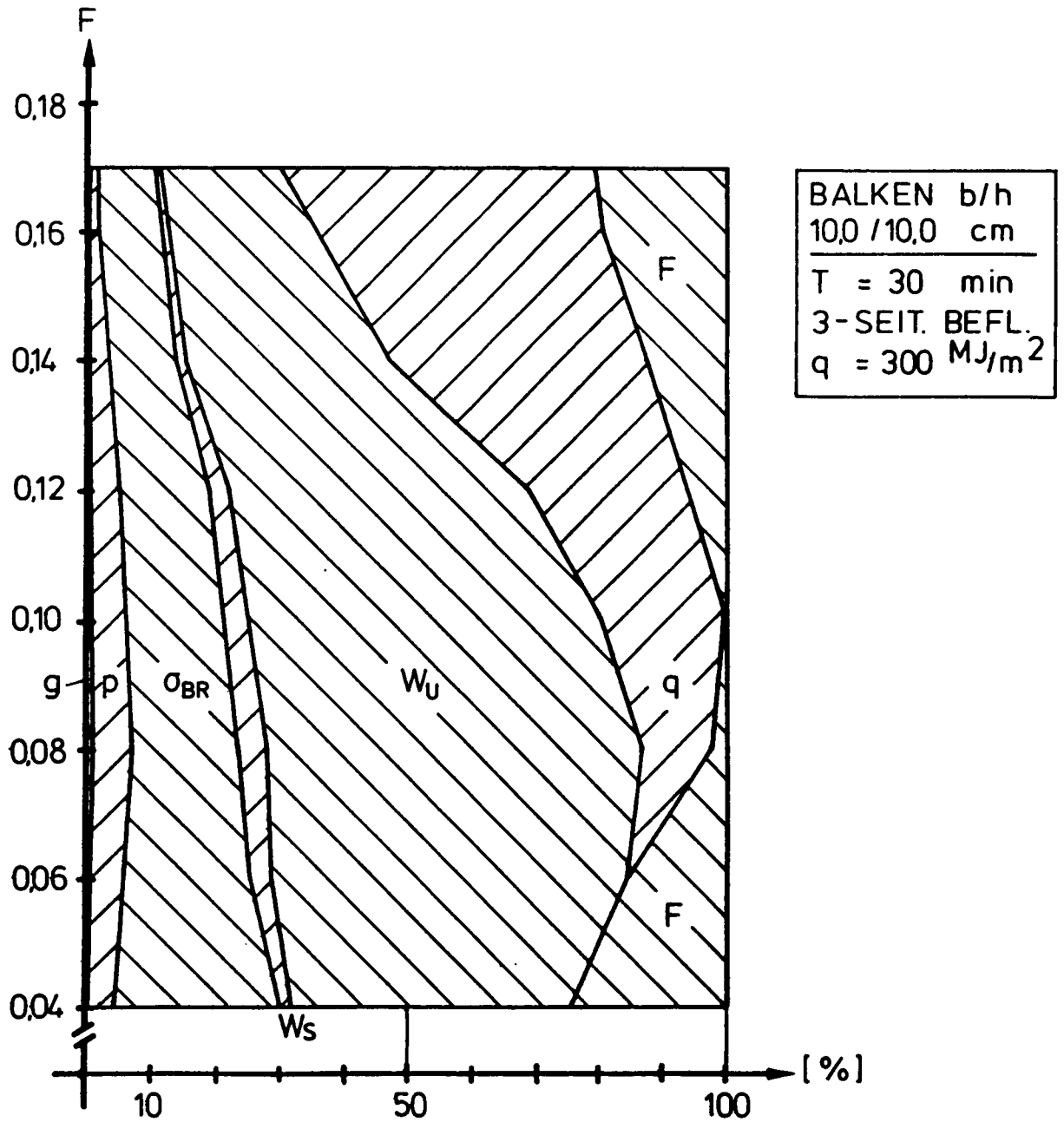


Bild 6.26

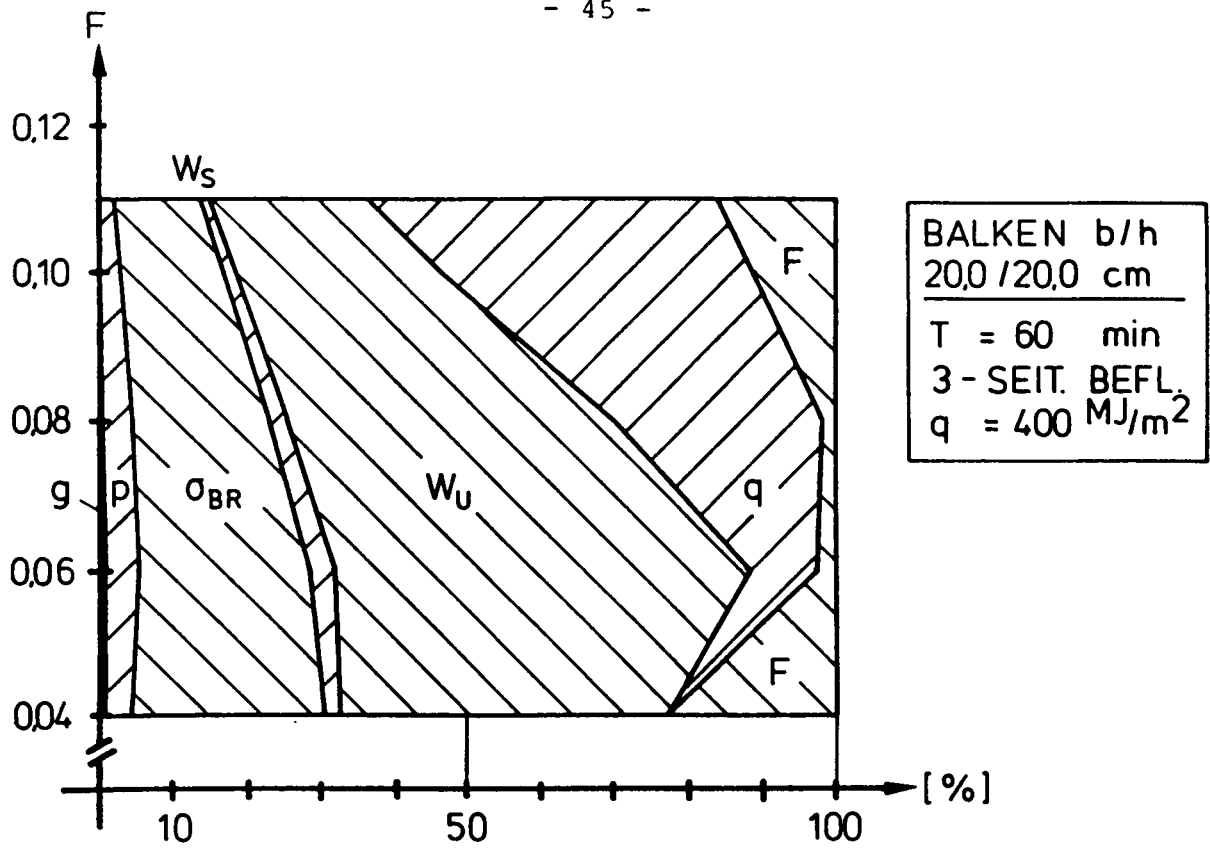


Bild 6.27

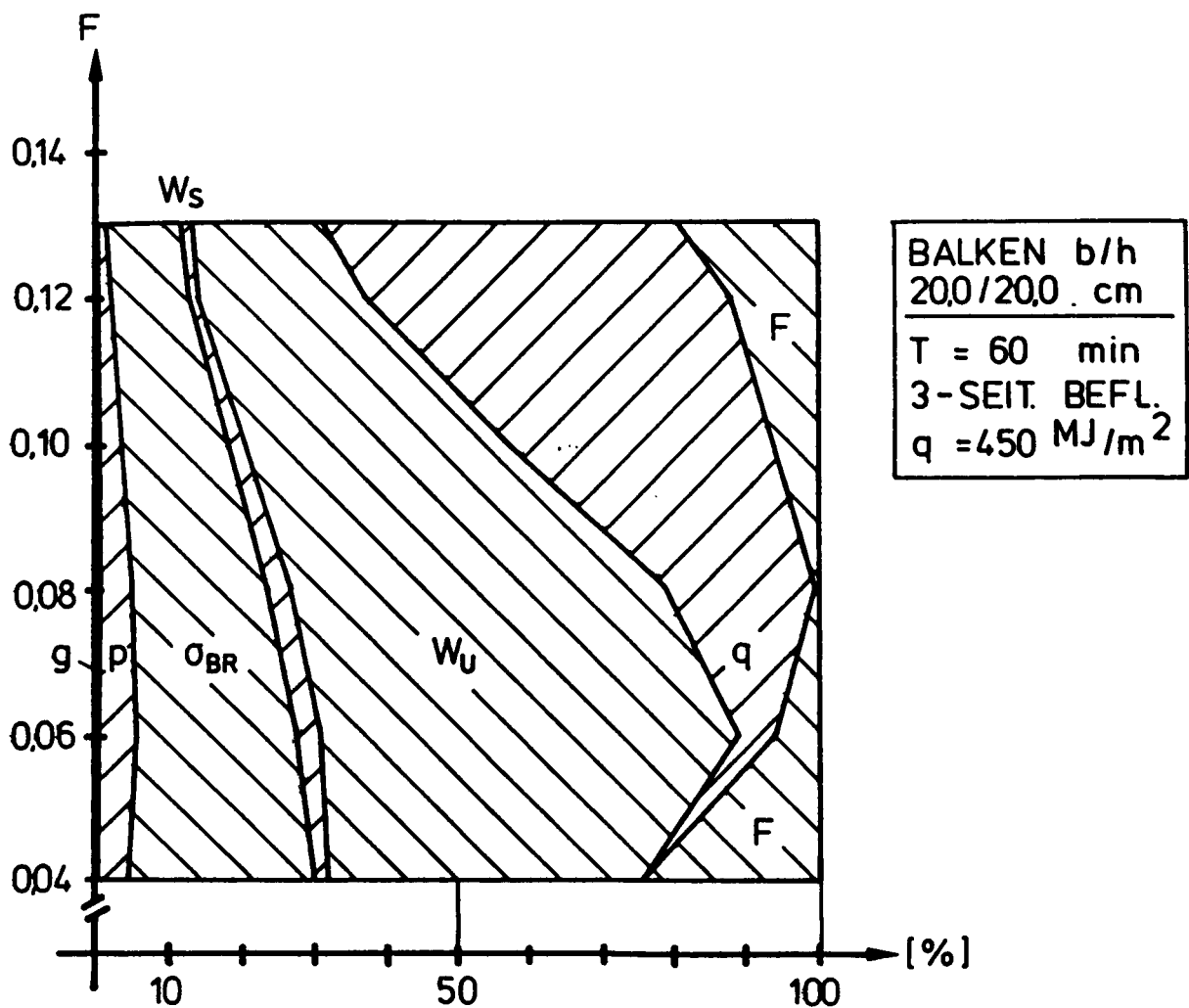


Bild 6.28



## 7. Zusammenfassung und Wertung der Ergebnisse

Zum Vergleich des rechnerisch vorhandenen Sicherheitsniveaus von Holzbauteilen bei einer Brandeinwirkung nach der ETK sowie bei einem "natürlichen Brand" wurden die maßgebenden Sicherheitsindices  $\beta$  stellvertretend für ausgewählte Stützen- und Balkenquerschnitte aus brett-schichtverleimtem Nadelholz berechnet. Die zur Durchführung dieser Berechnungen notwendigen mechanischen Modelle der zu untersuchenden Bauteile wurden anhand von Bauteilversuchen überprüft und im Rahmen der zur Verfügung stehenden Versuchswerte als ausreichend genau befunden. Des weiteren wurden die zur Durchführung dieser Untersuchungen maßgebenden Basisvariablen sowie deren Verteilungen mit den dazugehörigen Verteilungsparametern ermittelt.

Bezüglich der anzusetzenden Belastungsverteilungen wurden die in Abschnitt 4.4 erläuterten Annahmen getroffen, welche jedoch auch schon bei ähnlichen Untersuchungen angewendet wurden und somit vorerst als allgemein anerkannt anzusehen sind.

Die Berechnung der vorhandenen Sicherheitsindices  $\beta$  für die Stützen- und Balkenquerschnitte bei einer Brandeinwirkung nach der ETK ergab, daß auf der Grundlage der in DIN 4102 angegebenen Querschnittswerte kein einheitliches Sicherheitsniveau festzustellen ist. Aus diesem Grund mußte die Vergleichsrechnung unter Einbeziehung der für den natürlichen Brand relevanten Parameter exemplarisch für ausgewählte, repräsentative Stützen- und Balkenquerschnitte durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurden die verfügbaren Angaben über zu erwartende Brandlasten im Wohnungsbau zusammengetragen und miteinander verglichen. Da auch diese Angaben aus verschiedenen Literaturstellen jedoch kein einheitliches Gesamtbild ergaben, wurde die Berechnung der  $\beta$ -Werte bei natürlichem Brand als Parameterstudie in Abhängigkeit des Öffnungsfaktors  $F$  und der Entwurfsbrandlast  $q_t$  durchgeführt, um den Vergleich des Sicherheitsniveaus für beliebige Parameterkombinationen durchführen zu können.

Aus dem Vergleich des durch die Brandeinwirkung nach der ETK vorgezeichneten Sicherheitsniveaus mit den Verläufen der  $\beta$ -Werte bei 30 und 60 min Brandeinwirkungsdauer lassen sich nun folgende Schlüsse ziehen:

1. Gemäß den Messungen nach /12/ und /13/ (schwedische Messungen) ist für Wohnungen mit zwei bis drei Zimmern mit einem  $\bar{q}_t \approx 140 - 150 \text{ MJ/m}^2$  Umfassungsfläche zu rechnen.
2. Die in Abschnitt 6.2 angegebenen weiteren Brandlasten  $\bar{q}_g$  beziehen sich auf die jeweilige Zimmergrundfläche. Es ist nun die Frage, ob diese Brandlasten zur Umrechnung nach  $\bar{q}_t$  auf die Umfassungsfläche des jeweiligen Zimmers oder die Umfassungsfläche der als Brandabschnitt zu betrachtenden Wohnung zu beziehen ist. Da das Verhältnis von Grundfläche zu Oberfläche mit steigender Brandabschnittsgröße zunimmt, ergeben sich aus den Umrechnungen der Brandlast  $\bar{q}_g$  nach  $\bar{q}_t$  jeweils unterschiedliche Werte.

Als Mittelwert aller Messungen nach Abschnitt 6.2 kann  $\bar{q}_g \approx 430 \text{ MJ/m}^2$  angegeben werden. Erfolgt die Umrechnung nun z. B. für einen Brandraum  $b/l/h = 4/6/2,6 \text{ m}$ , dann ergibt sich  $\bar{q}_t = 103 \text{ MJ/m}^2$ ; wird dieser Umrechnung jedoch eine mittlere Zwei- bis Drei-Zimmerwohnung von ca.  $72 \text{ m}^2$  (rechteckiger Grundriß) mit gleicher Höhe zugrunde gelegt, dann ergibt sich  $\bar{q}_t$  zu  $130 \text{ MJ/m}^2$ . Damit wird der  $\bar{q}_t$ -Wert nach 1. fast erreicht. In Anbetracht dieser Erwägungen kann der zu erwartende Mittelwert der Brandlast  $\bar{q}_t$  - bezogen auf die Umfassungsfläche - analog den schwedischen Messungen zu  $\bar{q}_t \approx 140 - 150 \text{ MJ/m}^2$  angenommen werden.

3. Bei der Ermittlung der maximal zulässigen Brandlasten ist nun zu beachten, daß die oben angegebenen Werte nur die mobilen Brandlasten repräsentieren. Bei Brandräumen, deren tragende oder stützende Bauteile selbst aus brennbaren Materialien bestehen, ist ein entsprechender Zuschlag zur im Brandraum vorhandenen Brandlast zu machen. Diese mobile Brandlastgröße ist

jedoch - bedingt durch die jeweilige konstruktive Gestaltung des Brandraumes - schlecht allgemein quantifizierbar. Beim Vergleich der berechneten  $\beta$ -Verläufe mit dem durch die Brandeinwirkung nach der ETK vorgezeichneten Sicherheitsniveau ist also darauf zu achten, daß ein entsprechendes Vorhaltemaß zwischen der "Grundbrandlast" und der maximal zulässigen Brandlast vorhanden ist.

4. Beim Vergleich der rechnerisch ermittelten  $\beta$ -Verläufe für eine "natürliche" Brandeinwirkung bei Stützen ergibt sich, daß das durch die Brandeinwirkung nach der ETK vorgezeichnete Sicherheitsniveau bei 30 und 60 min Brandeinwirkungsdauer je nach den jeweiligen Stützenparametern bei Brandlasten zwischen ca.  $200 \text{ MJ/m}^2$  und  $270 \text{ MJ/m}^2$  unterschritten wird. Damit ist als Zuschlag zur ohnehin existierenden Brandlast ein Vorhaltemaß von ca.  $50 - 120 \text{ MJ/m}^2$  vorhanden, welches ausreichend erscheint, die durch die brennbaren Bauteile in den Brandraum zusätzlich eingetragenen Brandlasten abzudecken.

Dieser Sachverhalt läßt den Schluß zu, daß bei der Verwendung dieser Bauteile im Wohnungsbau eine Unterschreitung des durch die Brandeinwirkung nach der ETK vorgezeichneten Sicherheitsniveaus nicht zu erwarten ist.

Bezüglich der zulässigen Brandlasten für die untersuchten Balkenquerschnitte wird vorerst auf die Ausführungen in Abschnitt 65, Seite 37, 1. Absatz, verwiesen.

5. Bei der Übertragung der hier vorgelegten Rechenergebnisse auf andere Bauarten ist zu beachten, daß die angegebenen Brandlasten eigentlich nur für den Wohnungsbau gelten. Sollten die berechneten  $\beta$ -Verläufe zum Vergleich des vorhandenen Sicherheitsniveaus bei anderen Bauarten verwendet werden, ist die im Brandraum vorhandene Brandlast im Einzelfall zu ermitteln und der Vergleich dann auf dieser Basis durchzuführen. Dabei können z. B. bei den Stützenquerschnitten die Diagramme für die im Wohnungsbau kaum vorkommenden Knicklängen von 5 m herangezogen werden.

8 . A N H A N G

( A B B I L D U N G E N

6.3 - 6.10

U N D 6.13 - 6.20)

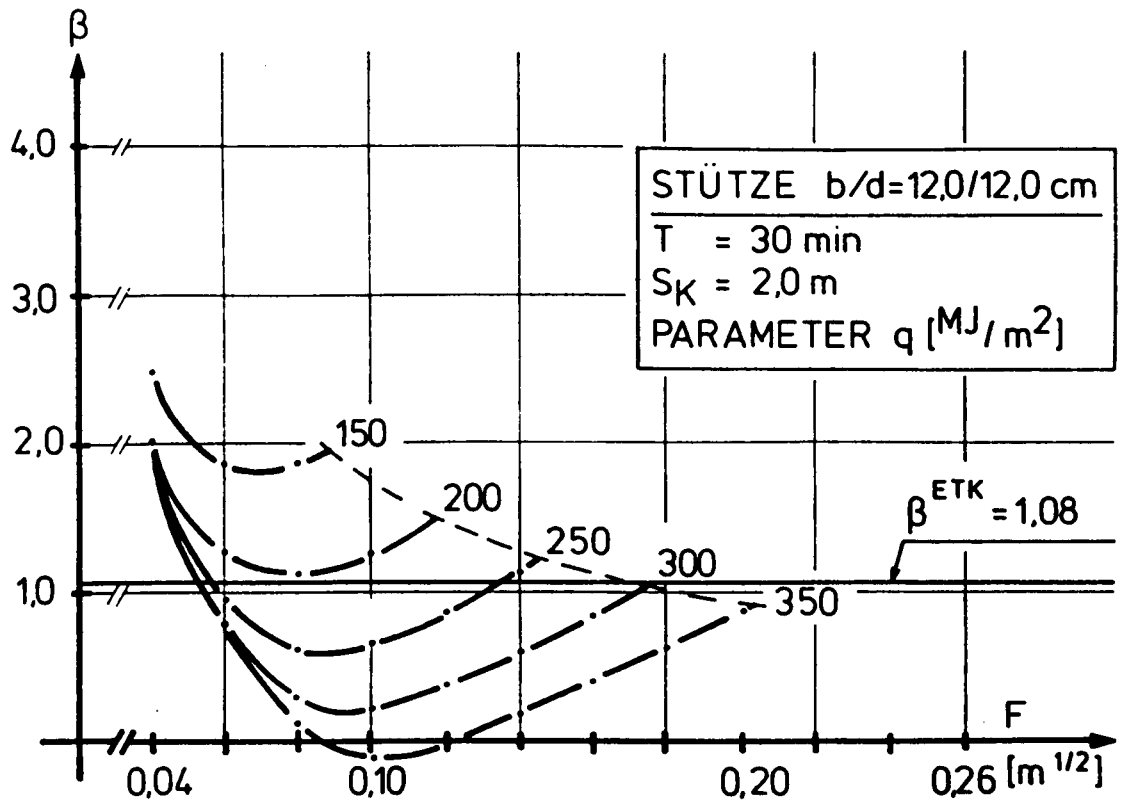


Bild 6.3

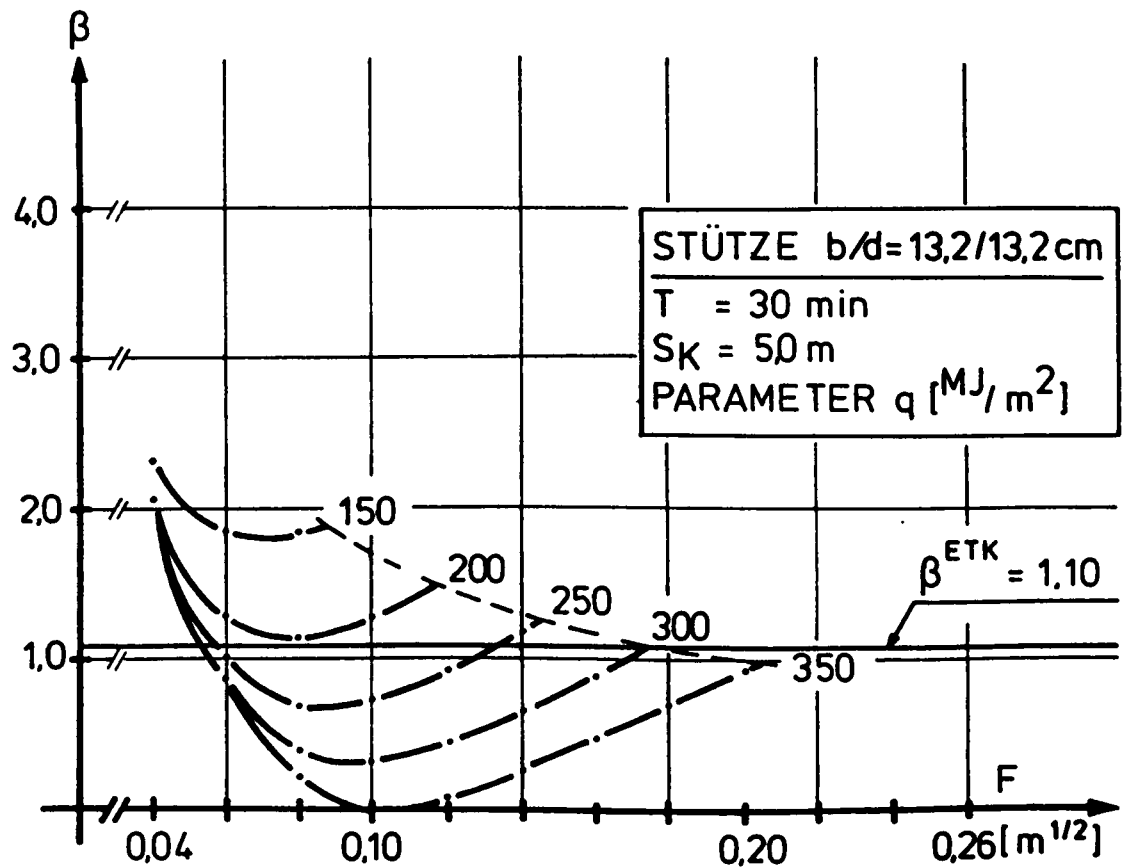


Bild 6.4

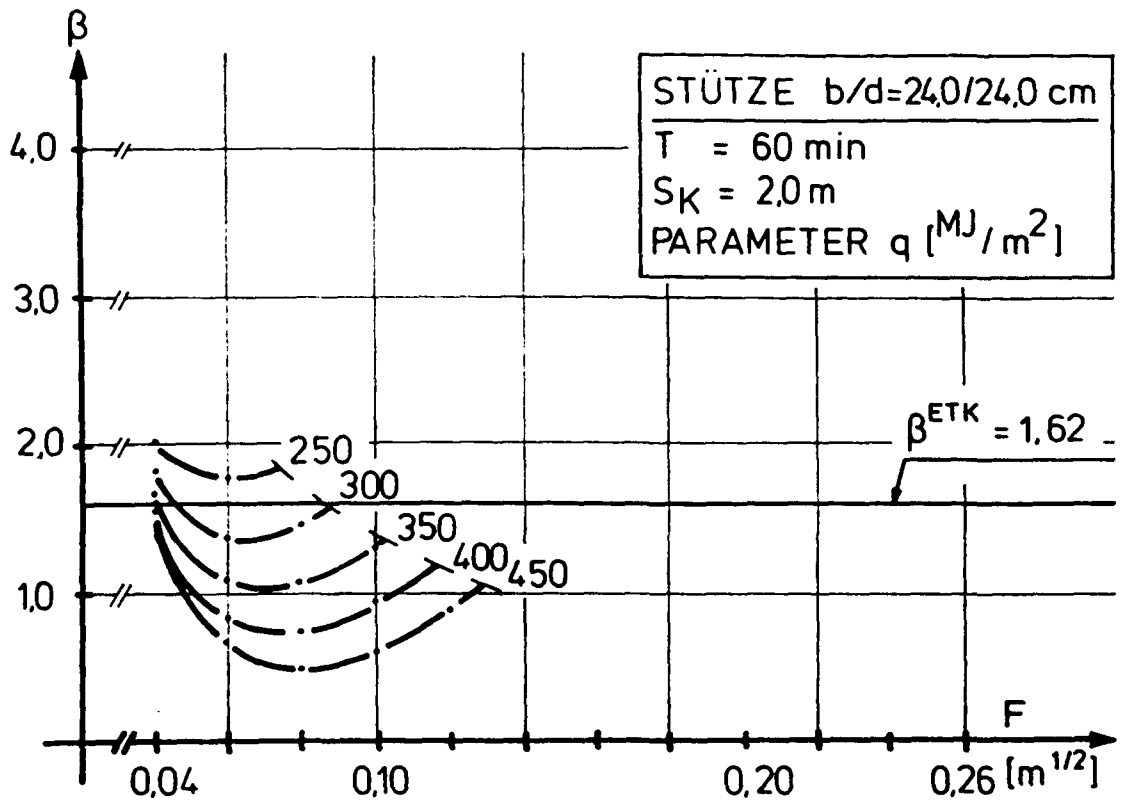


Bild 6.5

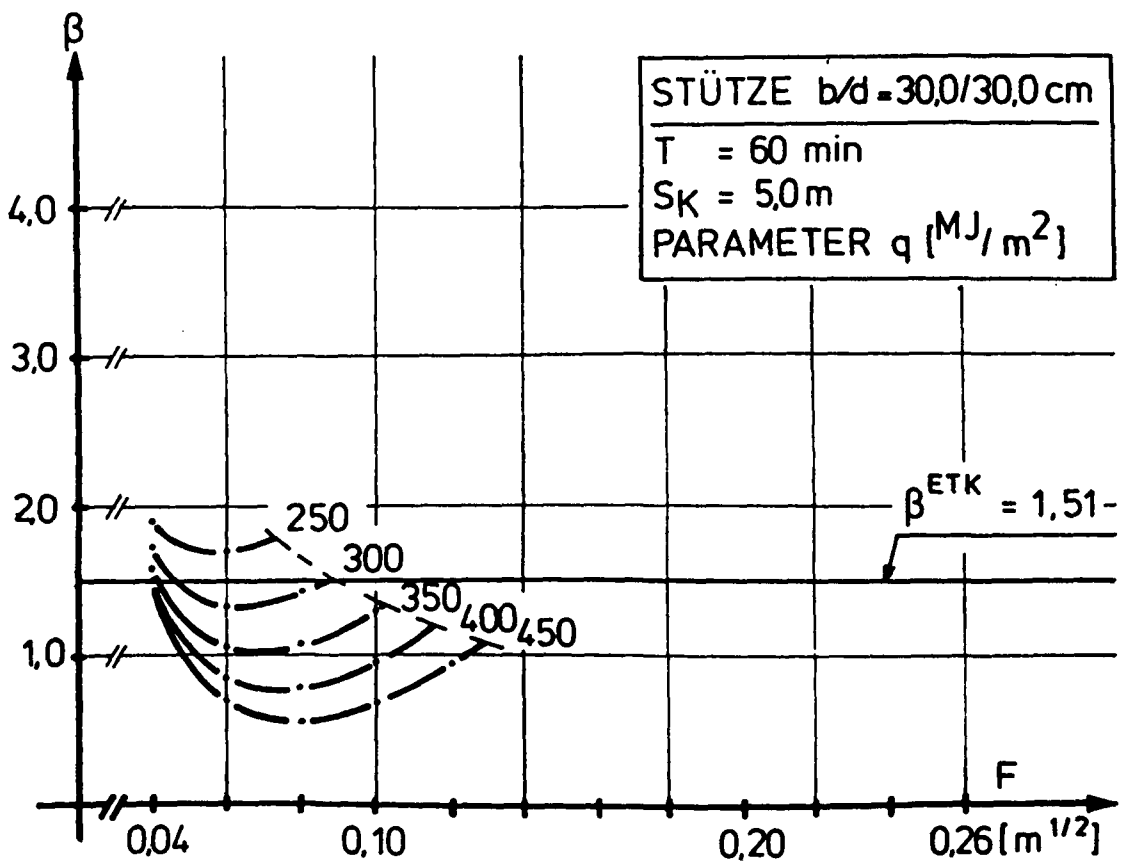


Bild 6.6

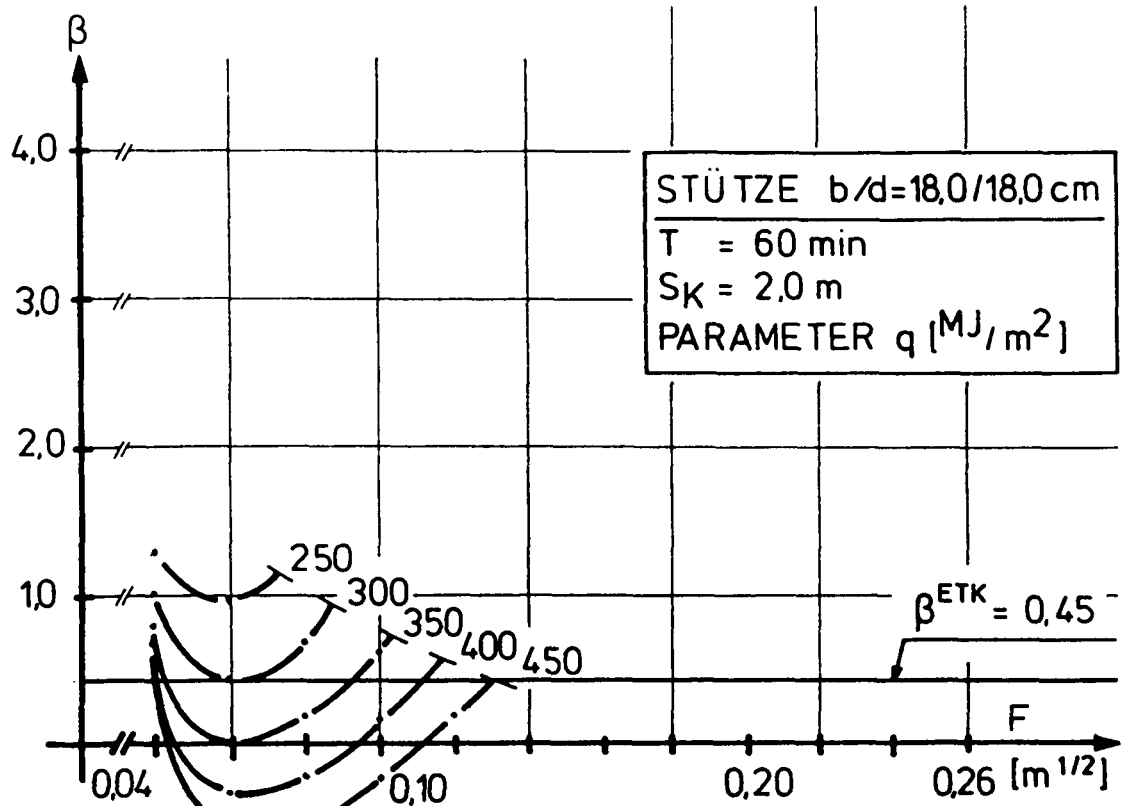


Bild 6.7

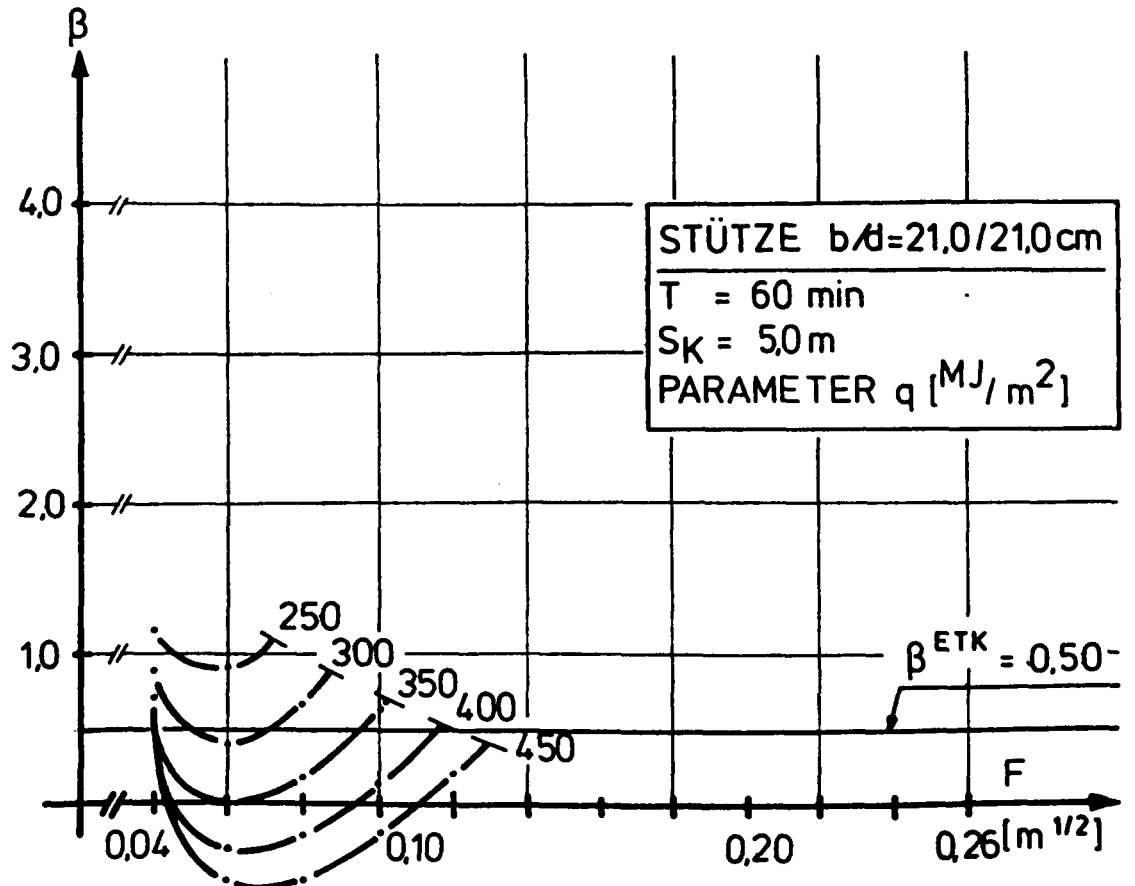


Bild 6.8

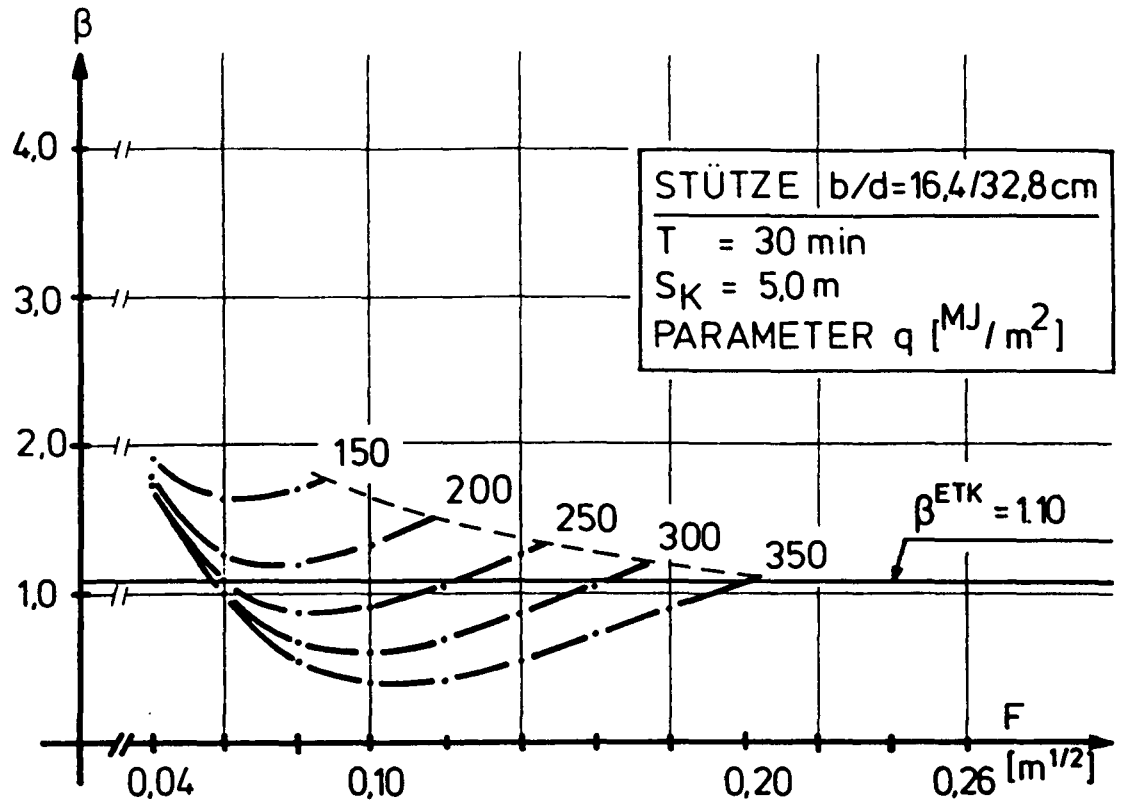


Bild 6.9

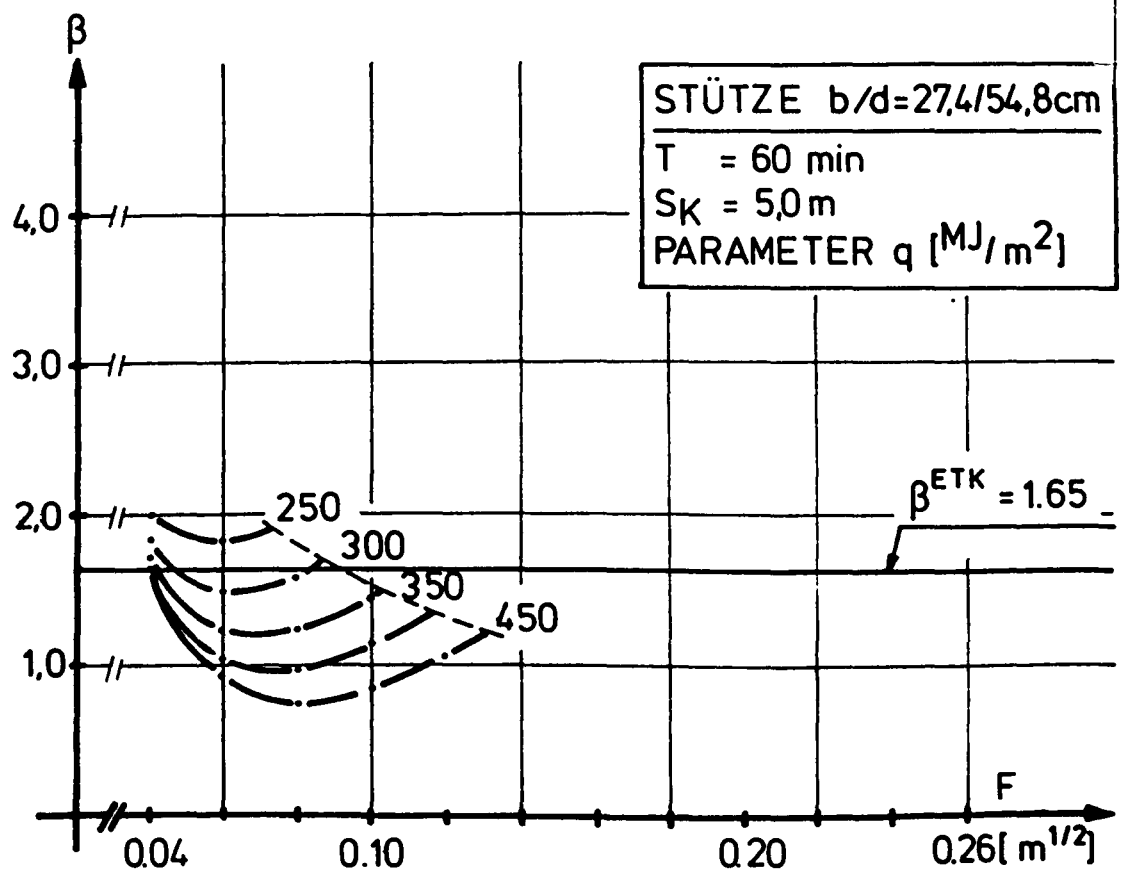
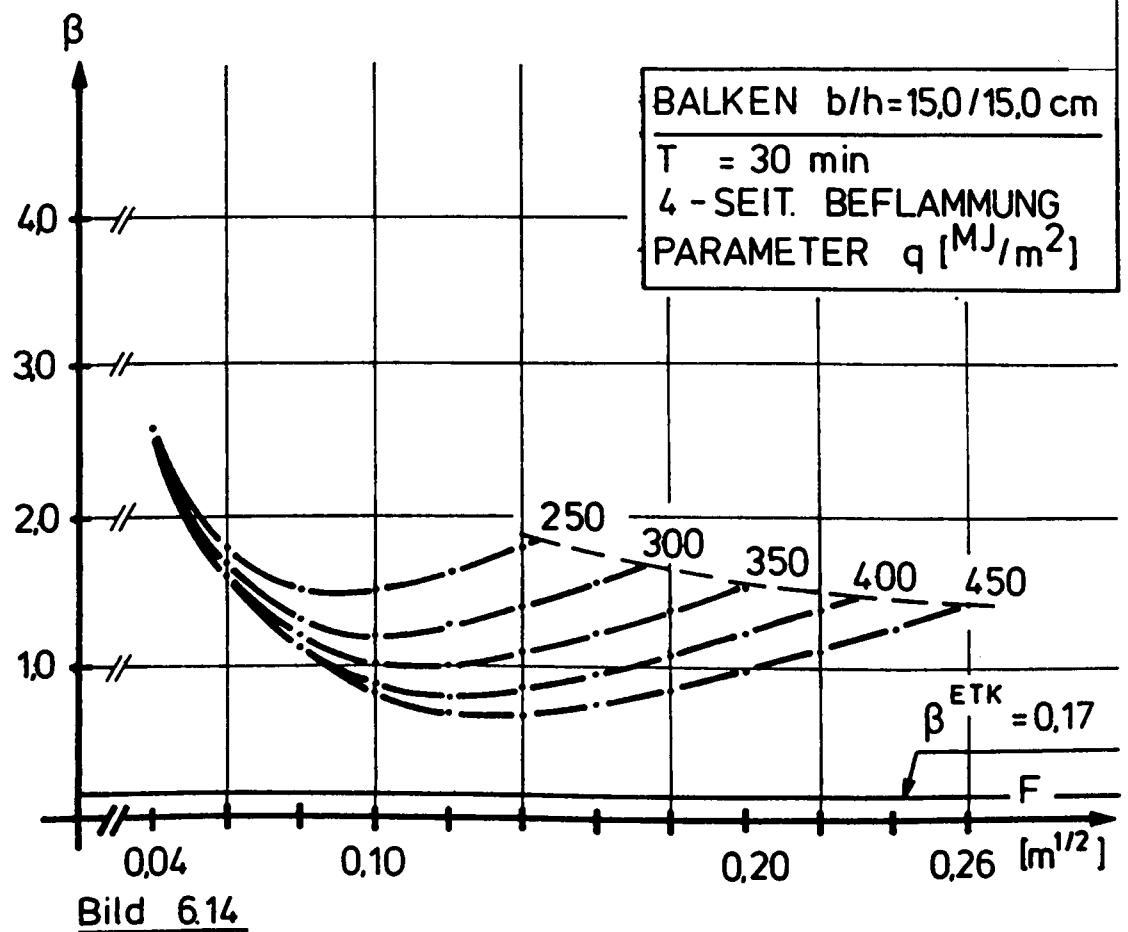
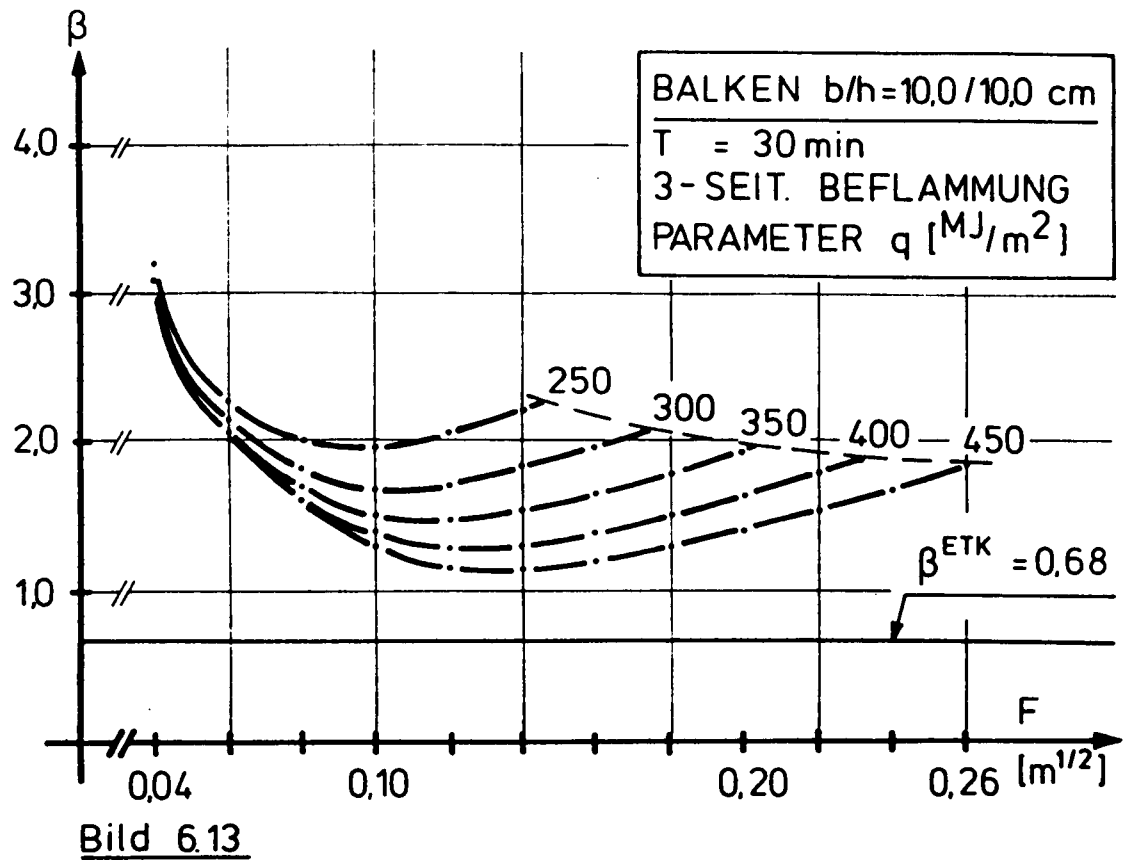


Bild 6.10





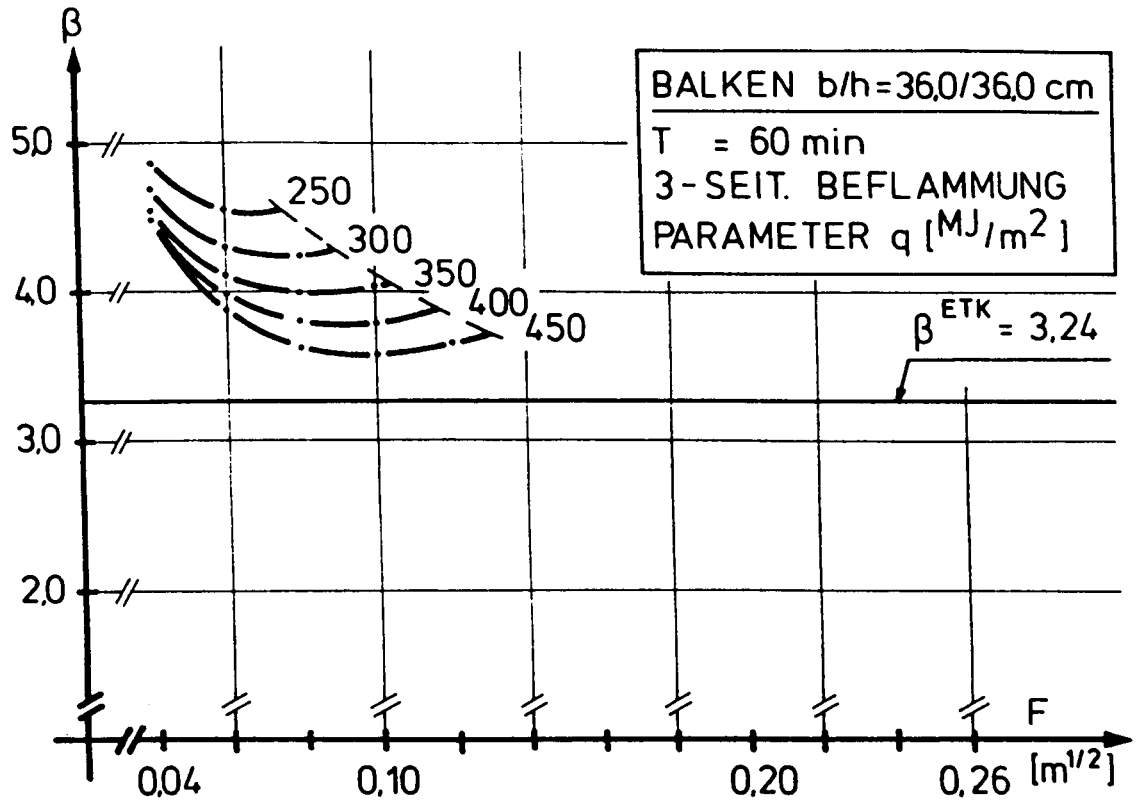


Bild 6.15

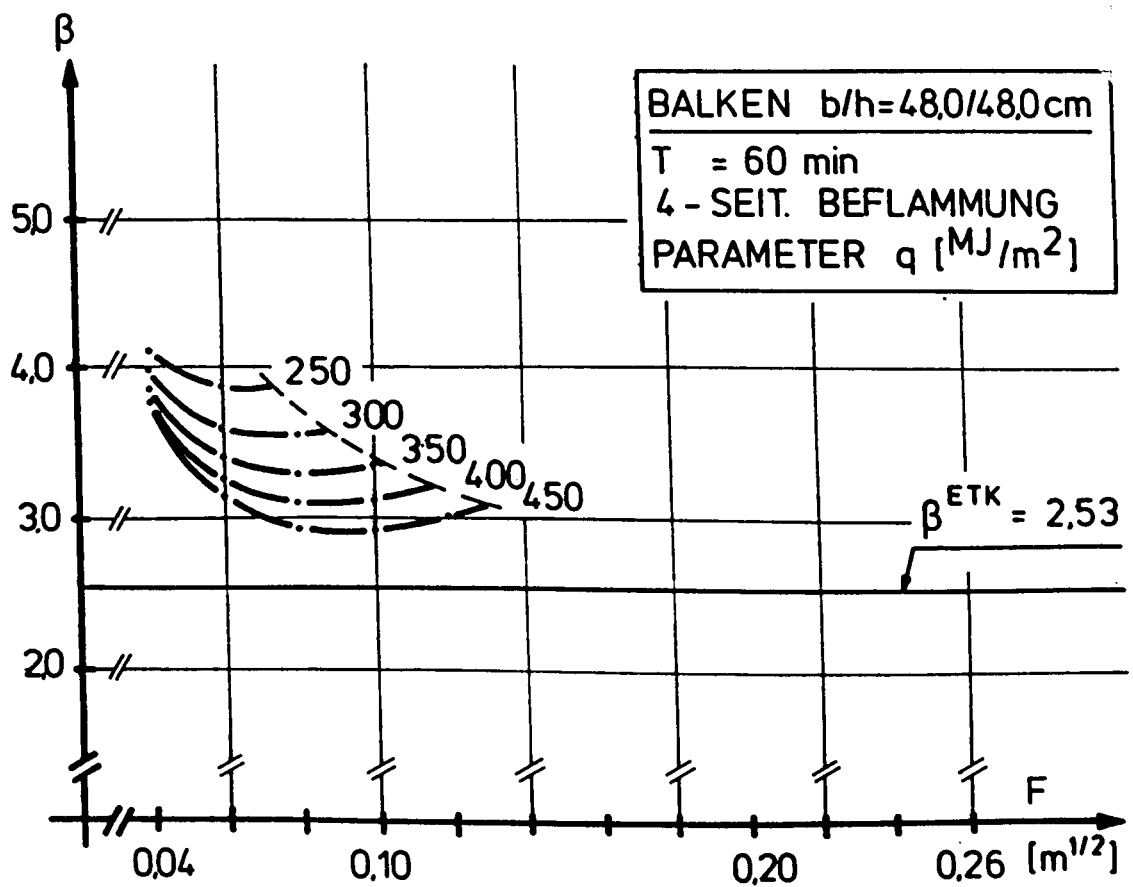


Bild 6.16

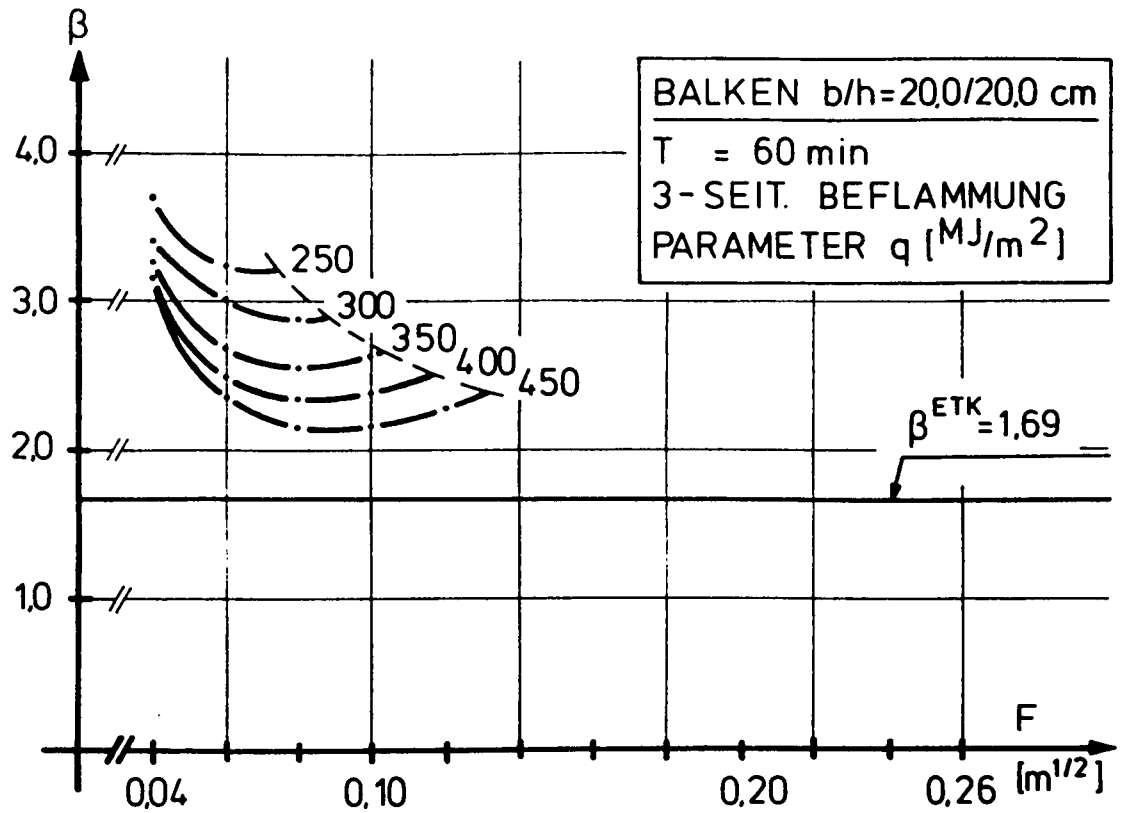


Bild 6.17

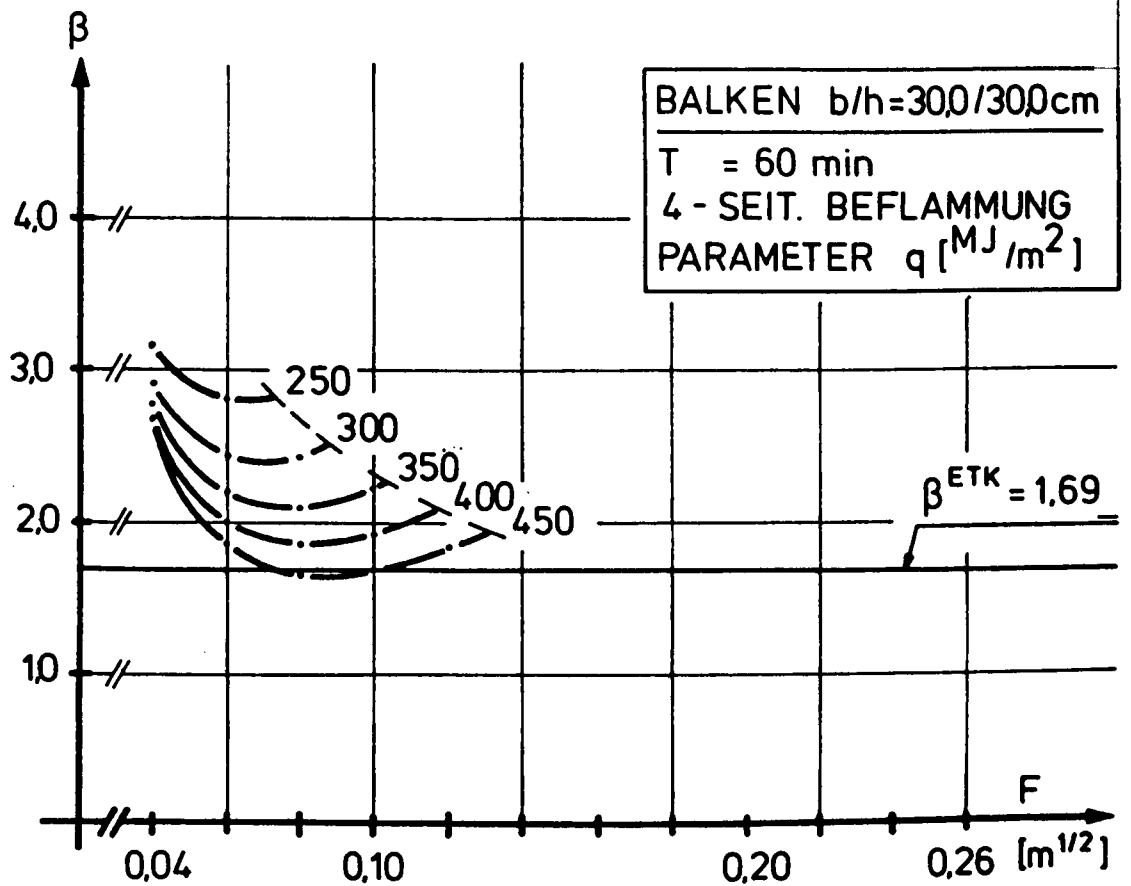


Bild 6.18

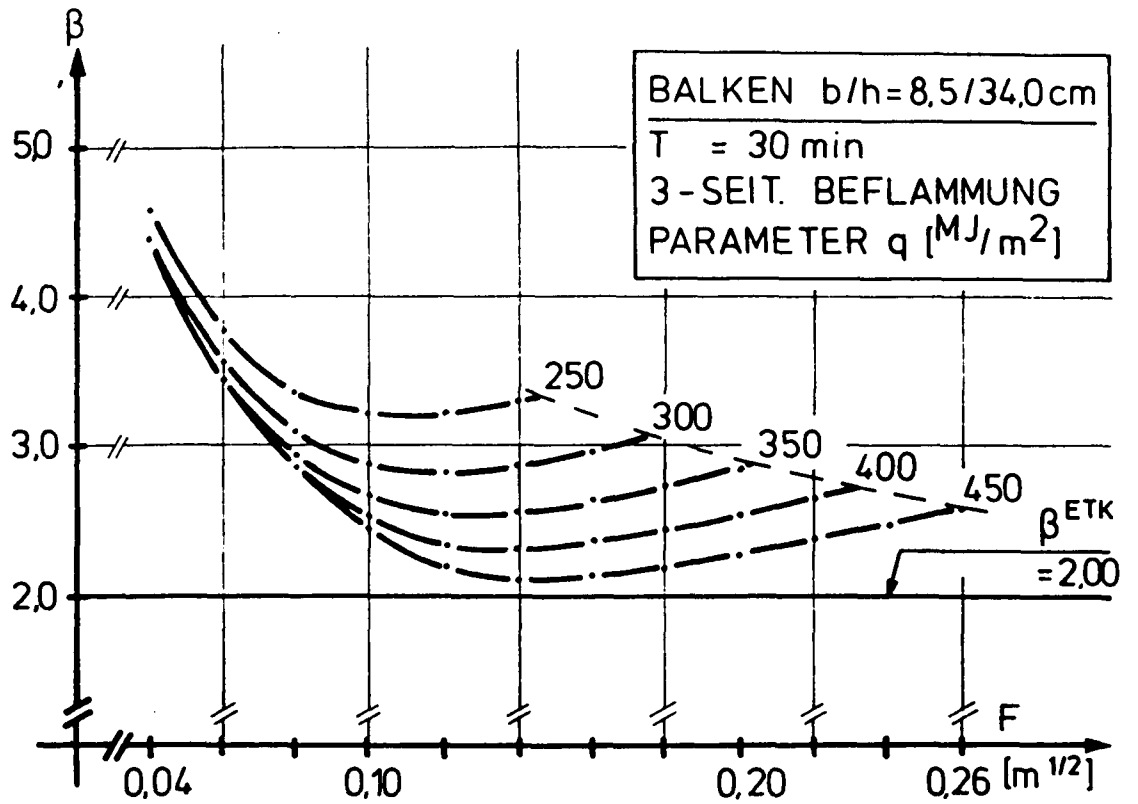


Bild 6.19

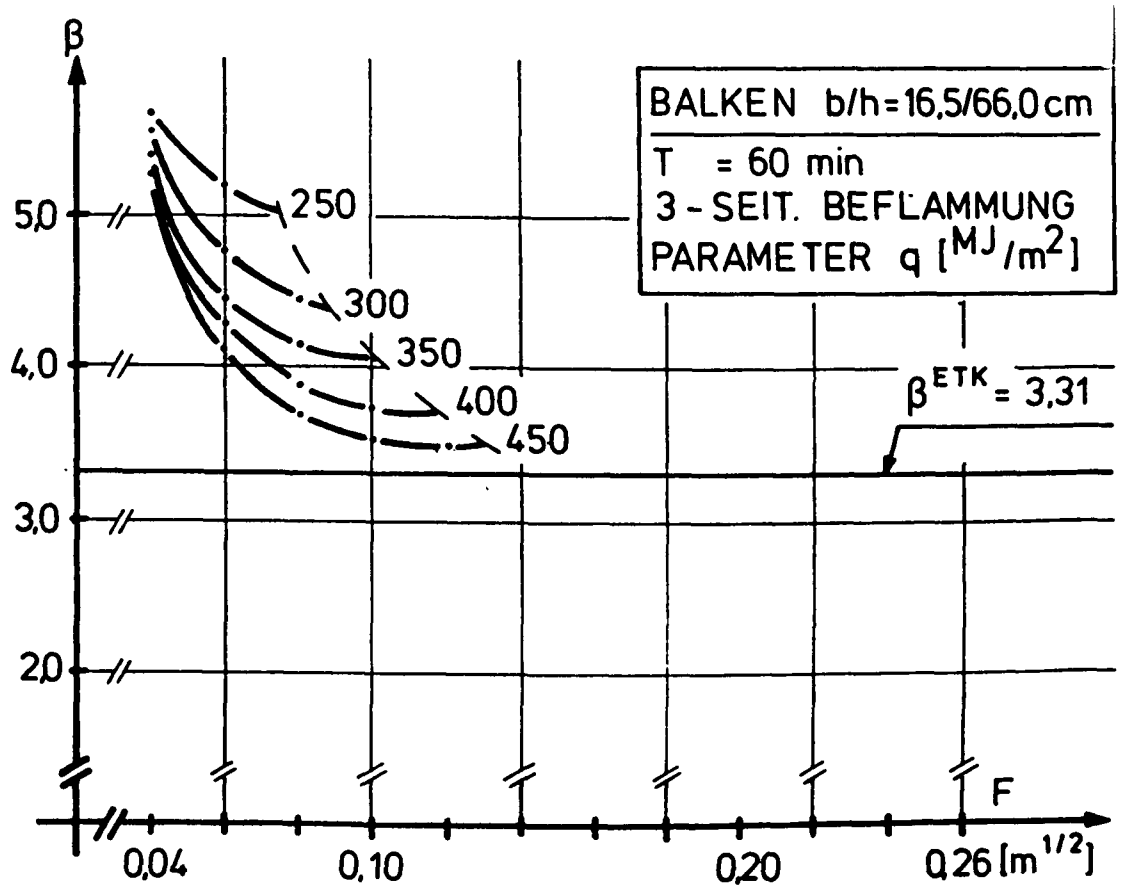


Bild 6.20

## 9 . L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

- /1/ -: Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen. Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag GmbH, Berlin - Köln 1981.
- /2/ Rudolphi, R.: Zur rechnerischen Übertragbarkeit von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen. Dissertation TU Berlin 1979.
- /3/ Stiller, J.-H.: Berechnungsmethode für brandbeanspruchte Holzstützen und Holzbalken aus brett-schichtverleimtem Nadelholz. Arbeitsbericht 1981 - 83, SFB 148 - Brandverhalten von Bauteilen, TU Braunschweig, Seiten A 3 - 1 - 1 bis 1 - 58.
- /4/ Henke, V.: Ein Beitrag zur Zuverlässigkeit frei gelagerter Stahlbetonstützen unter genormter Brandeinwirkung. Dissertation TU Braunschweig 1980.
- /5/ DIN 68364: Kennwerte von Holzarten; Festigkeit, Elastizität, Resistenz. Ausgabe Nov. 1979.
- /6/ Hosser, D.; Schneider, U.: Sicherheitskonzept für brand-schutztechnische Nachweise von Stahlbetonbauten nach der Wärmebilanztheorie. Forschungsvorhaben AZ: IV/1-1-252/80, gefördert vom Institut für Bautechnik, Berlin.
- /7/ König, J.; Hosser, D.; Schobbe, W.: Sicherheitsanforderungen für die Bemessung von baulichen Anlagen nach den Empfehlungen des NABau - eine Erläuterung -, Bauingenieur 57 (1982), Seiten 69 - 78.
- /8/ Hosser, D.: Tragfähigkeit und Zuverlässigkeit von Stahlbeton-druckgliedern, vereinfachte Nachweise bei beliebigen Einwirkungen und Randbedingungen. Dissertation TU Darmstadt 1978.
- /9/ Hadvig, S.: Charring of Wood in Building Fires; Practice, Theory, Instrumentation, Measurements, Technical University of Denmark, Lyngby-Denmark, 1981.

- /10/ Favre, J.: Swiss Risk Evaluation Method; in Appendix A.1.2, Fire Load Densities for Types of Building and Occupancies, des Draft Design Guide (Model Code) Structural Fire Safety, Marz 1984.
- /11/ Campbell, J.A.: NFPA 1981, Fire Protection Handbook, Section 5 ; 9. Confinement of Fire in Buildings.
- /12/ Pettersson, O.: ECC-TC3 Manual "Fire Safety and Steel Structures"; Chapter 2: Fire Exposure.
- /13/ Pettersson, O.; Magnusson, S.E.; Thor, J.: Fire Engineering Design of Steel Structures, Section 3: Fire Load.
- /14/ Bryl, S.: Brandbelastungen im Hochbau. Schweizerische Bauzeitung, 93. Jahrgang, Heft 17, Seiten 243 ff.
- /15/ Nilsson, L.: Fire Loads in Flats. Lund Institute of Technology, Bulletin 15, Lund 1970.
- /16/ Schneider, U.; Haksever, A.: Wärmebilanzrechnungen für Brandräume mit unterschiedlichen Randbedingungen. Heft 46 der Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, Februar 1981.